Astronomy Library
SEP 20 1921
Library of
Wellesley College.
NON MINISTRARI SED MINISTRARE.
Purchased from
The Horsford Fund.
No 101951

LES PLANÈTES

ET LEUR ORIGINE.

40049 PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
Quai des Grands-Augustins, 55.

ÉTUDES NOUVELLES SUR L'ASTRONOMIE

Par Ch. ANDRÉ et P. PUISEUX

LES PLANÈTES

ET LEUR ORIGINE,

PAR

Ch. ANDRÉ,

DIRECTEUR DE L'OBSERVATOIRE DE LYON.

PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

Quai des Grands-Augustins, 55.

—

1909

Tous droits de traduction et de reproduction réservés.

PRÉFACE.

A la fin du XVIIIe siècle, le système planétaire, connu des astronomes, comprenait six planètes et neuf satellites dont les mouvements, soit de révolution, soit de rotation, s'effectuaient tous dans le même sens, celui de la rotation du Soleil.

Dans le courant du siècle dernier, et depuis le commencement de celui-ci, un grand nombre de composants sont venus s'y ajouter : deux planètes extérieures, treize satellites, l'essaim des astéroïdes situés entre Mars et Jupiter; et, la moisson n'est certainement pas terminée. Le système planétaire s'est donc fort accru en nombre et en étendue ; mais, en même temps, il a perdu la grande régularité qui en faisait le charme aux yeux des anciens astronomes. Les mouvements de certains de ces nouveaux composants ne paraissent plus rentrer dans le cadre ancien; en outre, certains observateurs, et du plus grand mérite, ont cru pouvoir assigner à la rotation de Mercure et de Vénus des allures toutes différentes de celle des autres planètes et aussi affirmer pour Mars une constitution superficielle, et peut-être même d'ensemble, surprenante et unique dans notre système.

Résumer l'histoire de ces découvertes, retrouver dans l'action du Soleil la cause de ces mouvements nouveaux, discuter la question de ces rotations particulières et de cette constitution surprenante, tel est le but que je me suis proposé dans cet Ouvrage.

Observatoire de Lyon, ce 1er septembre 1908.

CH. ANDRÉ.

LES PLANÈTES

INTRODUCTION.

DONNÉES GÉNÉRALES SUR LE SYSTÈME PLANÉTAIRE.

Les planètes actuellement connues sont soumises dans leur mouvement autour du Soleil à trois lois fondamentales, dues au génie persévérant de l'immortel Képler et auxquelles on a donné son nom; ce sont les suivantes :

LOIS DE KÉPLER.

1° Chaque planète décrit autour du Soleil, d'Occident en Orient, une courbe plane, et, pendant ce mouvement, le rayon qui joint le Soleil à la planète décrit des aires égales en des temps égaux (*Loi des aires*).

2° Cette courbe est une ellipse très peu excentrique (presque un cercle), dont le Soleil occupe un des foyers.

3° Les carrés des temps que mettent les planètes à parcourir complètement leurs ellipses, ou *révolutions sidérales*, sont proportionnels aux cubes des grands axes de celles-ci.

Cette dernière loi, qui lie les différentes planètes les unes aux autres et montre qu'elles font partie d'un même système, permet, en particulier, de calculer au moyen des durées de révolution, donnée la plus immédiate de l'observation, les distances moyennes au Soleil des différentes planètes, par rapport à celle de l'une d'entre elles, la Terre par exemple, prise pour unité.

Si en même temps on rapporte les durées de révolution à celle de

la Terre ou année sidérale, on a pour cette loi l'énoncé simple qui suit : *le cube de la moyenne distance d'une planète au Soleil est exprimé par le même nombre que le carré de sa révolution sidérale* (1).

Le Tableau suivant donne les valeurs des principales caractéristiques des orbites des huit grosses planètes actuellement connues.

Noms et signes.	Durée des révolutions sidérales en années juliennes et en jours moyens.	Moyen mouvement diurne.	Distances moyennes au Soleil		Vitesse sur l'orbite en kilom. par seconde.	Excentricités.	Inclinaison sur le plan de l'équateur solaire.
			par rapport à la Terre.	en millions de kilom.			
	ans jours	° ′					° ′
☿ Mercure....	0. 87,97	3. 5,5	0,39	58	47,5	0,21	0.15′
♀ Vénus.....	0.224,70	1.36,0	0,72	108	34,9	0,01	3.51′
♁ La Terre...	1. 0,01	0.59,5	1,00	149	29,7	0,02	7.15′
♂ Mars.....	1.321,73	0.31,1	1,52	227	23,7	0,09	5.24′
♃ Jupiter....	11.314,84	0. 4,9	5,20	776	12,6	0,05	5.56′
♄ Saturne....	29.166,99	0. 2,0	9,54	1423	8,9	0,06	3.45′
♅ Uranus....	84. 7,39	0. 0,7	19,18	2861	6,7	0,05	6.29′
♆ Neptune...	164.280,11	0. 0,4	30,06	4483	1,5	0,01	5.28′

Excentricités. — Les excentricités sont en effet très faibles, sauf pour Mercure et Mars, dont les orbites diffèrent cependant bien peu de la forme circulaire.

Plan commun à toutes ces orbites. — L'inclinaison maximum de ces orbites sur le plan de l'équateur solaire est de 7°15′ : on est donc en droit de dire que toutes ces planètes effectuent leurs révolutions autour du Soleil dans un *même plan,* celui de l'*équateur solaire.*

Sens commun de ces mouvements. — De plus, toutes se meuvent autour du Soleil dans le sens même de sa rotation (d'Occident en Orient), comme si elles avaient fait partie de sa masse jusqu'à un moment donné et en avaient alors été séparées en conservant leur mouvement antérieur.

---

(1) Par exemple, la distance moyenne de Jupiter est alors 5,2, dont le cube est environ 140, nombre dont la racine carrée 11,8 est la durée de la révolution de Jupiter autour du Soleil, exprimée en années sidérales.

Distances. Loi de Bode-Titius. — Quant aux distances des planètes au Soleil, il est difficile d'admettre qu'elles se soient séparées de lui en des points en quelque sorte arbitraires et il paraît au contraire plus conforme à ce que Képler appelait l'*harmonie des cieux*, qu'elles se succèdent suivant un ordre nécessaire et régulier.

Les recherches, d'ailleurs indépendantes, sur ce sujet du mathématicien Titius de Wittemberg et du célèbre astronome Bode de Berlin ont abouti à une loi fort importante qu'on peut énoncer comme il suit :

Rapportons les distances des planètes au Soleil à une unité dix fois plus petite que celle du Tableau précédent. Elles seront en chiffres ronds représentées par les nombres ci-dessous (1) :

Mercure.	Vénus.	La Terre.	Mars.	Jupiter.	Saturne.
4	7	10	15	52	95

Il en résulte que leurs distances respectives à la première d'entre elles, Mercure, forment la série :

3	6	11	»	48	91

peu différente de celle-ci :

3	6	12	24	48	96

dont chaque terme est le double du précédent. En admettant leur identité, on a la *loi de Titius ou de Bode.*

Les distances des planètes à Mercure forment une progression géométrique dont le premier terme est 3 *et la raison* 2.

Il semble bien qu'une pareille coïncidence ne peut être due au hasard; c'est, en effet, ce que l'astronome américain Hinrichs a démontré en 1867. Partant des lois de Képler et de l'hypothèse de Laplace sur la formation du système solaire, il a prouvé que la loi de Titius est une conséquence de la condensation progressive de la nébuleuse solaire, condensation qui a dû être régulière et proportionnelle

(1) Nous ne nous occuperons ici que des anciennes planètes, les seules que connaissaient Titius et Bode. Nous verrons plus tard que la loi est très approchée pour Uranus et Neptune et l'importance qu'elle a eue dans la découverte de ces deux planètes.

au temps, de sorte que les nombres qui mesurent les distances des planètes mesureraient aussi les temps qui ont séparé leur formation.

Mais alors on doit en conclure, ainsi que Képler l'avait déjà fait, que, dans le système solaire tel que nous le montre le Tableau précédent, il existe entre Mars et Jupiter une lacune et qu'il doit y avoir vers la distance 24 de Mercure, ou 28 du Soleil, quelque corps, quelque planète qui n'y est point mentionnée.

Nous verrons plus tard que cette lacune a été comblée par le groupe des *astéroïdes* ou *petites planètes*.

Dimensions, masses, densités. — Pendant le cours de leur révolution, ces planètes sont à des distances variables de la Terre et, par suite, leur diamètre apparent change à chaque instant : pour nous faire une idée de leurs dimensions relatives, il faut donc comparer les valeurs qu'auraient ces diamètres si tous ces astres étaient à la même distance de nous, à la distance moyenne du Soleil à la Terre, par exemple. D'un autre côté, toutes sont, comme la Terre, des sphéroïdes, et les diamètres comparés doivent donc être semblablement placés : aussi l'on convient de prendre pour caractéristique des dimensions de chaque planète son *diamètre apparent équatorial à la distance* 1. Transformés avec les distances relatives que nous avons données plus haut, ces nombres deviendront les diamètres réels de ces planètes mesurés par rapport à l'un d'eux, celui de la Terre, pris pour unité; rien de plus facile que d'en déduire les rapports de leurs volumes. D'un autre côté, on connaît les rapports des masses des différentes planètes et du Soleil à l'une d'elles, la Terre, prise pour unité; les quotients de ces deux nombres donneront les densités relatives des différents astres.

Nous avons réuni ces diverses valeurs dans le Tableau qui suit, dont la figure 1 est une représentation graphique :

Noms.	Diam. équat. à la distance 1.	Diamètres relatifs. Terre = 1.	Diam. en kilom.	Aplatissement.	Volumes relatifs. Terre = 1.	Masses relatives. Terre = 1.	Densités. Terre = 1.	Densités. Eau = 1.	Pesanteur à l'équateur.	Albedo (1).
Mercure...	0°. 6′,61	0,373	4758	»	0,1	0,1	1,2	6,5	0,4	0,163
Vénus.....	0.17,55	0,999	12744	$\frac{1}{303}$	1,0	0,8	0,8	4,4	0,8	0,884
La Terre..	0.17,72	1,000	12756	$\frac{1}{297}$	1,0	1,0	1,0	5,5	1,0	»
Mars.....	0. 9,35	0,528	6735	$\frac{1}{105}$	0,2	0,1	0,7	3,9	0,4	0,256
Jupiter....	3.16,00	11,061	140952	$\frac{1}{17}$	1279,4	309,8	0,2	1,3	2,3	0,718
Saturne...	2.64,77	9,299	118502	$\frac{1}{9}$	718,9	91,9	0,1	0,7	0,9	0,841
Uranus...	1.15,02	4,234	73950	$\frac{1}{11}$	69,2	13,5	0,2	1,1	0,8	0,704
Neptune...	1. 7,21	3,978	48408	»	55,0	16,5	0,3	1,7	1,1	0,608
									Lune.....	0,150

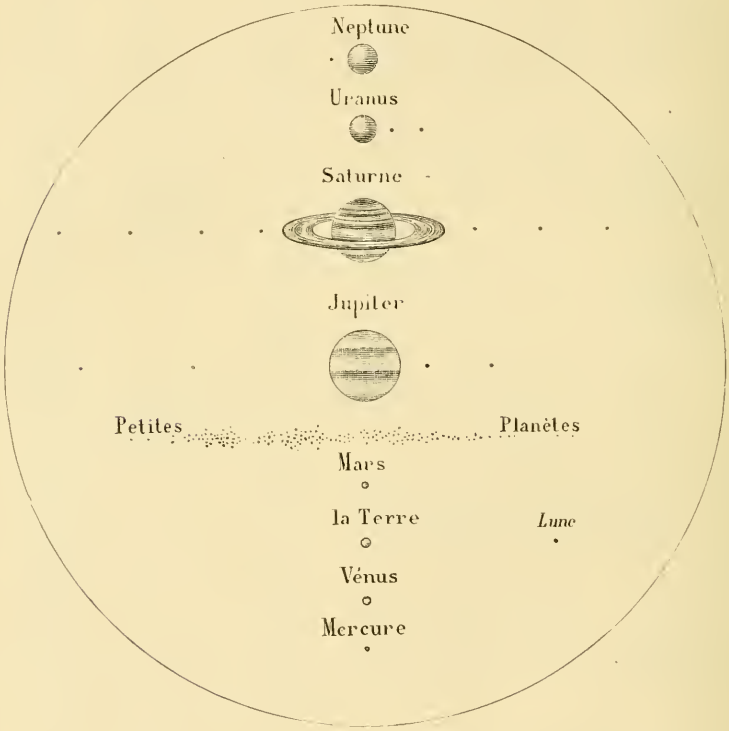
Pour comparaison, nous mettons ci-dessous les valeurs de ces divers éléments pour le Soleil :

Diam. équat. à la dist. 1.....	32′3″,64
Diam. relatif (Terre = 1).....	109,30
Diamètre réel en myriamètres.....	139426
Volume relatif (Terre = 1).....	1310162
Volume en trillions de km³.....	1419175
Masse relative (Terre = 1).....	324432
Densité (Terre = 1).....	0,25
Densité (eau = 1).....	1,4
Pesanteur à l'équateur.....	27,625

(1) *L'albedo* est le rapport de la quantité de lumière réfléchie par l'unité de surface de la planète à celle qu'elle a reçue du Soleil.

Partage des planètes en deux groupes. — L'examen de ce Tableau montre que ces huit planètes se partagent en deux groupes bien nets : les quatre planètes les plus voisines du Soleil : Mercure, Vénus, la Terre et Mars, dont la Terre est la plus grosse ; et les quatre autres : Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune, dont les dimensions sont beaucoup plus grandes que celles de la Terre ; parmi elles, Jupiter et Saturne ont un rang à part, leurs volumes étant environ 1300 fois et 720 fois celui de notre planète.

Fig. 1.



De même, les quatre premières planètes ont des masses inférieures à celle de la Terre, tandis que celles des quatre dernières lui sont de beaucoup supérieures; les masses de Jupiter (310) et de Saturne (92) sont d'ailleurs beaucoup plus grandes que celles d'Uranus (13) et de Neptune (16); la masse de Jupiter est à elle seule égale à deux fois et demie celle de l'ensemble de toutes les

autres planètes et à peu près la deux-cent-cinquantième partie de celle du Soleil.

La comparaison des densités conduit à des remarques aussi intéressantes : les quatre petites planètes ont sensiblement la même densité que la Terre, et les quatre grosses ont une densité très voisine de celle de l'eau, soit une densité quatre ou cinq fois moins grande que la première ; il est à remarquer que la densité de la planète Jupiter est, à quelques centièmes près, la même que celle du Soleil.

En résumé, les huit planètes principales se partagent en deux groupes de quatre ; les quatre planètes les plus voisines du Soleil sont petites et de densités relativement considérables ; les quatre planètes plus éloignées sont grosses, de fortes masses et de densités faibles.

Rotations. — Le déplacement de certaines taches ou bandes par rapport aux bords du disque, ou bien encore la disparition et la réapparition successives de certaines inégalités ou troncatures du terminateur, ont permis de constater la rotation sur elles-mêmes de six de ces planètes, d'en déterminer la durée, le sens et, pour quatre d'entre elles, l'inclinaison sur le plan de l'orbite de l'axe autour duquel elle s'effectue.

Au point de vue mécanique, il est bien certain que toutes ont un mouvement de rotation axiale ; mais, en raison de leur peu d'éclat et de leurs faibles diamètres apparents, l'observation directe, qui le soupçonne sur Uranus, n'a pu le mettre en évidence sur Neptune.

Nous donnons dans le Tableau qui suit les éléments de ces rotations, dont le sens, le même pour les six premières où on l'a déterminé avec certitude, est celui de la rotation du Soleil :

Planetes.	Durée de la rotation.	Sens de la rotation.	Inclinaison de l'équateur sur le plan de l'orbite.
Mercure.....	voisine de 24^h	Direct	»
Vénus.....	id.	Direct	»
La Terre.....	j h m s 0.23.56. 4	Direct	° ′ 23.27
Mars.....	1. 0.37.23	Direct	27.17
Jupiter (max.).	0. 9.55.37	Direct	3. 6
Saturne.....	0.10.38	Direct	25.42
Uranus.....	0. 8.30	Rétrograde	»
Neptune.....	»	Rétrograde	»

L'examen de ce Tableau montre que :

1° Les planètes du premier groupe ont sensiblement la même durée de rotation que la Terre, tandis que Jupiter, Saturne et Uranus tournent à peu près deux fois plus vite.

2° Quel que soit le groupe auquel elles appartiennent, l'axe de rotation de chacune des planètes anciennes fait un petit angle avec l'axe du plan de l'orbite; pour Jupiter, la planète maîtresse du système solaire, ces deux axes peuvent même être considérés comme coïncidant.

3° Le sens dans lequel s'effectue cette rotation est le même pour les six planètes anciennes, et est aussi celui de leur mouvement de translation autour du Soleil. Pour les deux planètes inconnues des anciens et les plus éloignées du Soleil, la rotation se fait en sens inverse.

Résumé. — En résumé, le système planétaire présente à partir de Mars un changement très important; jusqu'à lui les planètes sont petites, denses, de durée de rotation voisine de celle de la Terre, les deux planètes qui les suivent sont au contraire légères, volumineuses, de rotation deux fois plus rapide; de plus, entre Mars et Jupiter il y a l'anneau des astéroïdes. Il semble donc que la nébuleuse de Laplace, cette nébuleuse d'où serait sorti le Soleil et tout son cortège de planètes, n'était pas dans les mêmes conditions d'état lors de la formation des planètes extérieures à Mars et lors de la formation des quatre autres, et que, d'autre part, la formation du groupe des astéroïdes correspond à la période de transformation intermédiaire entre ces deux états.

De même, le groupe des grosses planètes paraît devoir être partagé en deux; le changement de sens de la rotation indiquant pour Uranus et Neptune, dont les masses sont d'ailleurs faibles par rapport aux deux autres, un mode de formation différent de celui de Jupiter et Saturne.

En général, ces planètes sont accompagnées d'astres beaucoup plus petits qu'on appelle des *satellites,* décrivant autour d'elles des orbites planes et fermées, sur lesquelles leur marche est gouvernée par les mêmes lois que les planètes elles-mêmes, chacune constituant avec eux un système absolument analogue, au point de vue mécanique, à celui que forme le Soleil avec son cortège de planètes. Nous nous en occuperons plus loin avec le détail que leur étude comporte.

PREMIÈRE PARTIE.

PLANÈTES.

CHAPITRE I.

MERCURE ET VÉNUS.

Nous avons réuni ces deux planètes dans un même Chapitre, surtout parce qu'en général leur étude a été faite par les mêmes observateurs; certains des problèmes difficiles, dont leur proximité du Soleil retardait la solution, leur paraissant être analogues et devoir aboutir à des conclusions semblables.

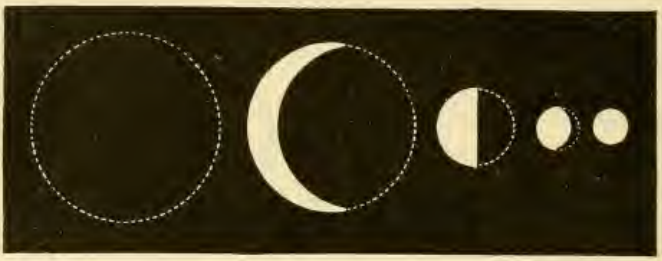
Il est cependant entre elles des différences caractéristiques sur lesquelles nous insisterons tout d'abord.

I. — Différences entre ces planètes.

Comme la Lune, Mercure et Vénus se présentent à nous sous des phases d'éclairement bien différentes suivant l'époque où elles se trouvent de leur révolution synodique (*fig.* 2). Mais la loi de variation d'éclat est-elle la même pour ces trois astres? Après les recherches théoriques de Lambert, Euler et Seeliger et les observations de Bond et de Zöllner, cette loi est bien connue pour la Lune : elle a servi de base de comparaison pour les deux planètes. Pour Mercure, qui dans nos latitudes ne reste jamais au-dessus de l'horizon plus d'une heure et demie avant le lever et après le coucher du Soleil, nous n'avions, avant Müller de Potsdam, que trois déterminations isolées de Zöllner et deux de Vogel. On doit à Müller (1878-1888) une série systématique de mesures d'éclat réparties sur des angles de

phase variant de 50° à 120°, ainsi qu'une discussion d'ensemble des estimations de grandeurs stellaires de Mercure faites par Schmidt à Athènes de 1861 à 1880 et qui furent retrouvées après sa mort dans le recueil de ses manuscrits.

Fig. 2.



Le résultat est que la variation de l'éclat de cette planète, qui, estimé en grandeur stellaire, varie, dans les limites indiquées, de $-1^{gr},9$ à $1^{gr},1$, suit absolument la même marche que pour la Lune, et qu'elle a comme notre satellite un albedo très faible (0,163 pour Mercure et 0,150 pour la Lune, soit à peu près celui de la marne argileuse). On doit en conclure que, sur cette planète, ce sont des parties solides qui sont le principal corps réfléchissant et que par suite l'atmosphère qui l'environne est transparente et très peu dense.

Nos documents sont évidemment beaucoup plus nombreux pour Vénus : les plus importants, outre les déterminations de Bond, Zöllner, Plummer et Pickering, sont les belles séries de mesures photométriques de Seidel (1852-1857) et de Muller (1877-1890), dont les dernières s'étendent à un intervalle de 220 jours avant ou après chacune des conjonctions, et à des angles de phase variant de 20° à 160°. Pour cette planète, la loi de variation des éclats ne ressemble pas à celle de la Lune ou de Mercure; pour le même intervalle en angle de phase (50° à 120°), l'éclat de Vénus estimé en grandeur stellaire varie d'une unité ($-4^{gr},3$ à $-3^{gr},3$), tandis que, pour Mercure, la variation était de deux grandeurs. D'autre part son albedo est beaucoup plus considérable 0,859 (supérieur à celui de la neige récente) que celui de Mercure : on comprend aisément, à la lumière de ces nombres, que Copernic observant à une latitude assez forte (Dantzig) et gêné par les brouillards de la Vistule soit mort sans

avoir pu rencontrer l'occasion d'apercevoir Mercure, tandis qu'au contraire tout le monde peut en plein jour, avec un peu d'attention, voir Vénus à l'œil nu à peu près en tous les points de son orbite [1] (jusqu'à 10° de distance angulaire pour les conjonctions inférieures et à 5° pour les conjonctions supérieures).

D'un autre côté, l'albedo considérable de Vénus ne peut appartenir à une surface solide : c'est celui d'une masse nuageuse. Vénus est donc entourée d'une atmosphère dense et non transparente; aussi l'éclat des parties médianes de cette planète est-il, d'après Christie, sept fois plus grand que celui des parties marginales.

En résumé, des deux planètes inférieures, l'une, la plus voisine du Soleil, serait sans atmosphère et par suite inhabitable; l'autre aurait au contraire une atmosphère très dense, peut-être plus dense que la nôtre.

Nous allons les étudier autrement.

II. — Atmosphère de Vénus.

Allongement des cornes du croissant. — Lorsque, vers l'époque des conjonctions inférieures, Vénus se montre à nous sous la forme d'un croissant très délié, les cornes dépassent souvent beaucoup la demi-circonférence, limite géométrique de son étendue, et parfois même occupent les trois quarts du cercle (Trouvelot).

Schrœter. — Cet allongement a été signalé pour la première fois par le célèbre astronome de Lilienthal, Schrœter, qui, de 1779 à 1794, fit des observations nombreuses et soignées de Mercure et de Vénus; il l'a expliqué par une réfraction des rayons solaires à travers son atmosphère. Les dimensions de cet allongement donnent aisément la valeur de la réfraction horizontale à la surface de cette planète et, par comparaison avec sa valeur à la surface de la Terre, une indication assez approchée de la densité de l'atmosphère à la surface de Vénus.

Mædler et Neison. — Les mesures de Schrœter ont été reprises

---

[1] Lors du passage de 1874, et malgré l'humidité considérable de l'atmosphère à notre station de Nouméa, nous avons pu, M. Angot et moi, apercevoir d'emblée Vénus à l'œil nu en plein midi jusque quatre jours avant la conjonction.

en 1849 à Dorpat par Mædler et Lyman. La discussion de cet ensemble d'observations a conduit l'astronome anglais Neison (1875) au chiffre de 53′40″ pour valeur de la réfraction, et par suite à celui de 1,9 pour densité relative de l'atmosphère de Vénus à sa surface, densité sensiblement double de celle de l'atmosphère terrestre à la surface de notre globe. Il semble alors probable qu'en observant Vénus aussi près que possible de la conjonction inférieure, cette atmosphère doit nous apparaître, sur le fond relativement sombre du ciel, sous forme d'un anneau lumineux, dû à son éclairement par les rayons solaires qui la traversent; c'est, en effet, ce qui a été souvent constaté.

Vénus à sa conjonction inférieure, Derham, Zenger, Perrotin. — Il convient d'en rapprocher un autre fait bien curieux.

A cette phase, où la presque totalité de l'hémisphère tournée vers nous ne reçoit aucun rayon du Soleil et par suite devrait être invisible, les lunettes nous montrent, en plein jour et même en plein midi, la totalité du disque de la planète.

La première constatation de ce fait est due à Riccioli (9 janvier 1643) et elle a été souvent renouvelée depuis; la planète apparaît alors sous forme d'un disque de couleur rougeâtre ou gris cendré suivant les observateurs, à l'intérieur du croissant formé par la lumière directe du Soleil.

Les observations les plus décisives de Zenger sont des 8 et 9 janvier 1883, un mois après la conjonction inférieure (6 décembre 1882); elles ont été faites entre 6^h et 8^h du matin, par un ciel d'une limpidité parfaite.

« Je ne m'attendais pas, dit-il, à un aussi ravissant spectacle; non seulement le disque entier de Vénus était visible, mais il s'y montrait une quantité de détails qui ne pouvaient laisser de doute sur la réalité du phénomène.

» Le caractère le plus saillant de l'observation est l'anneau, que j'ai pu découvrir tout autour du disque (partie obscure et croissant), rouge brun, plus prononcé sur le côté éclairé que sur la portion obscure du limbe, mais d'une couleur cuivreuse spéciale, ayant la plus étroite ressemblance avec la teinte cuivreuse que prend le disque de la Lune dans une éclipse totale. »

Quelques années plus tard (1890) Perrotin refait à l'Observatoire

de Nice l'étude de la même question. Voici ce qu'il dit de l'observation du 22 novembre 1890, 11 jours avant la conjonction inférieure (3 décembre 1890), jour où le phénomène s'est montré avec le plus de netteté :

« Le 22 novembre à $4^h 30^m$ on croit distinguer tout le disque ; mais ce qu'on voit le mieux (*fig.* 3) est une vaste région lumineuse L,

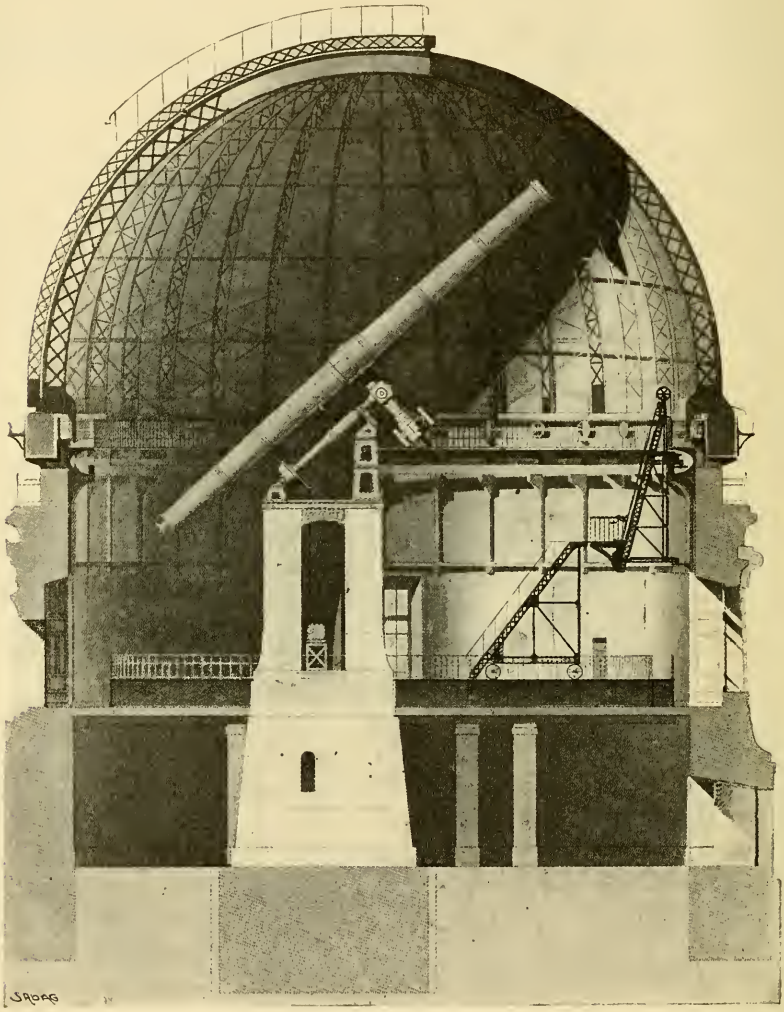
Fig. 3.

à peu près concentrique au pôle de l'hémisphère obscur, qui occupe la plus grande portion d'une calotte sphérique dont la ligne de terminaison s'arrête à 30° ou 40° du bord obscur. En se rapprochant du croissant de la planète, la lumière diminue d'intensité. La courbe qui en marque la limite du côté du bord obscur paraît légèrement elliptique. » Perrotin se servait soit d'un équatorial de $0^m,38$, soit de la grande lunette de $0^m,76$ construite par les frères Henry et M. P Gautier pour l'Observatoire de Nice (*fig.* 4).

Dans ces deux observations de Zenger et de Perrotin, il n'y a qu'une chose commune, c'est la vision du disque presque complet de Vénus ; mais, quant aux caractères que présente son aspect, tout y diffère et il semble bien difficile de trouver une raison de préférence entre les deux.

Quelle est la cause de cette visibilité de la portion du disque de Vénus non éclairée directement par le Soleil, ou si l'on veut de cette

Fig. 4.



Grand équatorial de l'Observatoire de Nice.

luminosité particulière qu'on a appelée *lumière cendrée* ou mieux *lumière secondaire* de Vénus?

Au commencement du XIXe siècle on l'a attribué à un phénomène

analogue à celui de nos aurores boréales, et cette hypothèse, défendue plus tard par l'illustre Bessel, et reprise ensuite par Schiaparelli et Perrotin, leur a servi d'argument en faveur de la durée de rotation qu'ils préconisaient pour Vénus.

Beaucoup d'astronomes et parmi eux Zenger y voient au contraire le résultat de l'illumination par diffusion de l'atmosphère épaisse qui entoure la planète.

Étant données les différences d'aspect qu'ont signalées les divers observateurs, il est bien difficile de se décider en faveur de l'une ou l'autre de ces explications. Il convient cependant de remarquer que la seconde, qui rend compte également de l'anneau observé par Zenger, est universellement admise pour d'autres phénomènes analogues que nous allons décrire.

Aspect de Vénus lors de ses passages sur le Soleil. Mouchez, Vessey. — Lors de certaines de leurs conjonctions inférieures, Vénus ou Mercure, se trouvant à une distance angulaire de l'écliptique moindre que le demi-diamètre apparent du Soleil, sont vus par une certaine portion de la surface de notre globe comme traversant le disque solaire suivant des cordes plus ou moins distantes de son centre : c'est ce que l'on appelle un *passage de la planète sur le Soleil.*

Pour les observateurs de cette portion du globe, ces deux planètes, au fur et à mesure de leur rapprochement angulaire de l'astre radieux, se plongent progressivement dans ses rayons; et si elles sont entourées d'une atmosphère un peu dense, il semble probable que son existence doit se manifester par des apparences lumineuses se superposant à l'aspect géométrique que présenterait le passage d'un disque obscur de petit rayon sur un disque lumineux beaucoup plus grand.

C'est, en effet, ce qu'ont signalé un certain nombre d'observateurs lors des passages de Vénus de 1874 et de 1882.

Voici, par exemple, ce qui résulte du Rapport de Mouchez sur son observation faite à l'île Saint-Paul en 1874 (objectif de $0^m,24$).

19 minutes avant le premier contact interne, Mouchez aperçoit subitement le disque entier de Vénus dont la moitié environ, encore hors du Soleil, est dessinée et rendue visible par une pâle auréole plus brillante près du Soleil, surtout du côté droit, que vers

le sommet de la planète et qui persiste jusqu'au contact autour de la partie du disque de Vénus extérieure au Soleil. De même, après le second contact interne, cette portion extérieure devient également visible par une apparence lumineuse absolument analogue.

Cette auréole, qui se montre ainsi à 20″ environ du bord du Soleil, lui a paru formée de deux parties distinctes : une lueur pâle ayant environ de 2″ à 4″ de largeur, difficile à bien mesurer parce qu'elle se fondait par dégradation insensible dans l'atmosphère solaire, et ensuite une ligne brillante excessivement fine, bordant directement la planète. Cette ligne était sensiblement plus brillante que ne le comportait l'augmentation progressive de la lumière de l'auréole, en allant de la circonférence vers le centre, elle était aussi sensiblement plus brillante près du Soleil qu'au sommet de la planète; mais le petit reflet brillant avait si peu d'épaisseur qu'il n'a pas été possible de le rendre visible dans les figures 5 et 6, qui représentent ces apparences à deux instants différents de l'entrée de la planète.

Fig. 5.

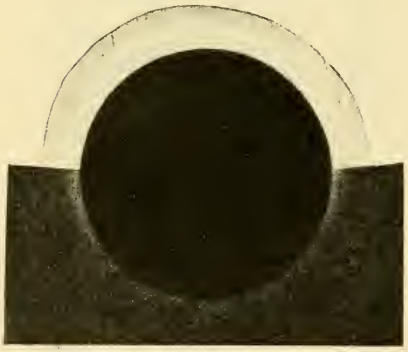
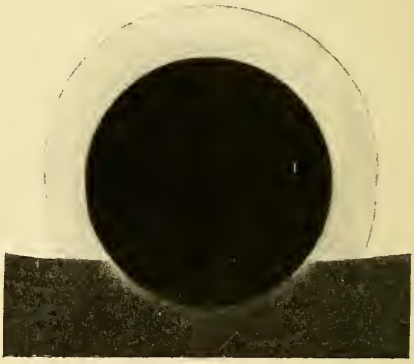


Fig. 6.



Pour M. Vessey qui observait (objectif de $0^{m},11$) le même passage à Woodford, dans les montagnes Bleues (Nouvelle-Galles du Sud), les apparences se réduisent à ce filet lumineux.

18 minutes avant le premier contact interne, « le limbe de Vénus était défini par une ligne fine de lumière, portion d'un véritable anneau de lumière beaucoup plus brillant du côté nord. Cette ligne lumineuse était très distincte, Vénus formant un cercle complet » (*fig.* 7).

Cet anneau se retrouva à la sortie après le second contact interne et persista pendant 15 à 16 minutes après lui (*fig.* 8).

Fig. 7.

Fig. 8.

Tous les observateurs qui, en 1874 ou en 1882, ont signalé ces apparences lumineuses disent qu'ils les ont aperçues tant que la planète n'a été engagée qu'à peu près à moitié sur le Soleil.

Cet étroit anneau, partie la plus constante de ces apparences lumineuses, est évidemment dû à la réfraction des rayons solaires dans l'atmosphère de Vénus; quant à l'ensemble de l'auréole, dont la perception paraît dépendre beaucoup de l'ouverture de l'instrument, ce serait l'enveloppe coronale du Soleil, moins sombre que le fond du ciel et rendue visible par contraste quand le disque de Vénus, beaucoup plus noir que le fond du ciel, en cache une partie.

Passage de Mercure sur le Soleil. Expérience faite à l'Observatoire de Greenwich. — Les passages de Mercure, beaucoup plus fréquents que ceux de Vénus, ont été le sujet d'observations répétées; mais, au point de vue des apparences physiques que Mercure présente alors qu'il est sur le disque du Soleil, les déclarations des observateurs sont depuis fort longtemps contradictoires. Tandis que les uns voient la planète entourée d'un anneau lumineux d'une largeur variant depuis le tiers jusqu'aux deux tiers de son diamètre et même

aussi munie d'une petite tache brillante presque en son centre, les autres, et c'est ce que MM. Angot, Hatt et moi avons constaté en mai 1878, à Ogden, la représentent comme un disque noir obscur, bien limité et absolument dépourvu de toute inégalité lumineuse.

Pour décider la question, l'Observatoire de Greenwich entreprit, lors de ce même passage de mai 1878, une expérience grandiose. On l'y observa, surtout en vue de ces apparences, avec quatorze instruments différents, d'ouvertures variant entre $0^m,33$ et $0^m,07$; les résultats obtenus n'ont pas la netteté qu'on avait espérée; néanmoins la conclusion à en tirer paraît être que, dans le cas de Mercure, les apparences signalées sont purement subjectives et doivent être considérées comme provenant des défauts optiques des instruments employés.

On a ainsi une nouvelle preuve des différences de constitution superficielle des deux planètes qui avoisinent directement le Soleil. Cependant nous devons ajouter que si, dans les passages de 1891 et 1894, Barnard n'a observé sur Mercure aucune des apparences dont nous venons de parler, il a, lors du dernier, cru constater ce fait curieux que le disque de Mercure lui a alors paru non pas d'un noir obscur, mais un peu plus lumineux que le fond du ciel aux alentours du Soleil. La démonstration, qu'en donne cet astronome, n'est d'ailleurs pas absolument convaincante et il faut attendre de nouvelles observations pour chercher à l'expliquer.

III. — Rotation de Vénus et de Mercure.

Exposé de la question. — Les durées de rotation des deux planètes inférieures, Mercure et Vénus, ont constitué pendant les dernières années l'un des points les plus discutés de l'Astronomie physique; les astronomes se sont partagés en deux camps, les uns tenant pour une durée d'environ 24 heures, les autres affirmant des périodes d'environ 88 jours pour la première et 225 jours pour la seconde.

Comment expliquer de pareilles différences tout à fait en dehors de la précision ordinaire de l'Astronomie, et comment la question a-t-elle été résolue? Ce problème fort intéressant demande à être traité avec quelques détails; et tout d'abord il convient d'en connaître les difficultés.

Difficultés du problème. — Une détermination directe des conditions de la rotation d'une planète exige, avant tout, l'existence sur son disque de particularités ayant un caractère bien distinct, d'inégalités lumineuses, nettes, stables et bien limitées. Or, sur Vénus, voici ce que l'on constate dans les conditions les plus favorables à son observation, c'est-à-dire lorsque, n'étant pas très éloignée de sa plus grande élongation, elle est voisine de sa phase dichotome.

La région contiguë au limbe tourné vers le Soleil est toujours plus brillante que les parties plus centrales qui s'étendent vers le terminateur, toujours bordé par une pénombre étroite : dans ces portions on voit souvent des espèces de taches, les unes blanchâtres, rondes et relativement petites, les autres grisâtres, de forme allongée et plus étendues, parfois sous forme de bandes étroites parallèles au terminateur ; toutes sont plus fréquentes et plus visibles au voisinage du terminateur, mais toujours peu distinctes, de contours si vagues et si insaisissables qu'il est souvent difficile de décider si l'on a affaire ou non à une illusion ; elles ont toutes peu de durée, parfois se forment et disparaissent sous l'œil même de l'observateur, rappelant de près ces jeux rapides de lumière que du sommet d'un pic élevé on observe sur la mer de nuages qui l'entoure.

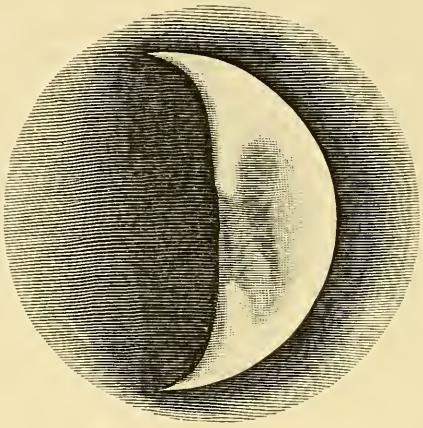
Dans certains cas, du reste assez rares, les taches sont un peu plus accentuées, les blanches un peu plus brillantes, les grises un peu plus sombres, et quoique leurs contours soient toujours vagues l'esprit n'a aucun doute sur leur réalité ; bien que plusieurs d'entre elles aient été vues pendant plusieurs jours consécutifs à peu près à la même position, on est loin de pouvoir en conclure que l'on a eu affaire à la même tache ; le contraire serait plutôt le cas.

Toutes les inégalités lumineuses dont nous avons parlé sont, en effet, dues à des différences d'albedo des différentes parties des couches supérieures de l'atmosphère si épaisse de Vénus : bien certainement aussi ces taches ont par leur nature même des mouvements qui peuvent différer beaucoup d'une tache à l'autre suivant la profondeur de la couche réfléchissante.

Outre ces formes vagues et éphémères on a vu sur Vénus d'autres taches beaucoup plus caractéristiques et d'un genre tout différent. Elles se distinguent par une étendue bien plus considérable, par une durée plus longue et par des contours qui, bien que vagues encore, sont quelquefois assez décidés pour donner à ces formes un cachet

réel d'objectivité : telle est la *grande tache grise* (*fig.* 9) observée par Trouvelot du 3 au 6 septembre 1876, retrouvée par lui 15 ans plus tard et qu'il a pu suivre alors du 18 au 25 février 1891. Ces phénomènes, signalés pour la première fois par cet astronome, et qui

Fig. 9.



correspondent à un état tout particulier de stabilité des couches supérieures de l'atmosphère de Vénus, sont certainement très rares.

Telles sont les variations d'aspect toujours diffuses et presque toujours incertaines dont disposaient les astronomes qui les premiers tentèrent de déterminer les éléments de la rotation des deux planètes inférieures.

En outre, leur matériel instrumental n'était pas propre à des observations aussi délicates; pour éviter les colorations des images on avait augmenté, peu à peu, la distance focale de l'objectif, et l'on était arrivé à employer des lentilles de 22^{m} de foyer, dont les ouvertures, généralement de 5^{cm} à 6^{cm}, ne dépassaient jamais 10^{cm}. L'image focale obtenue était donc fort peu lumineuse, et, d'un autre côté, on l'observait avec un oculaire presque indépendant de l'objectif et qu'on devait souvent promener à la main.

J.-D. Cassini, Bianchini. — Aussi J.-D. Cassini ne conclut-il même pas, de ses observations de 1666 et 1667, à la réalité de la rotation; « c'est en vain, dit-il, qu'on tâcherait de déterminer, par

ce moyen, s'il y a mouvement ». Soixante ans plus tard, Bianchini fut plus audacieux et peut-être moins scrupuleux. Comme résultat des observations qu'il fit sur Vénus, à différentes reprises (1726-1727), à Rome et à Albano, non seulement il affirme la réalité de la rotation, donne la valeur de sa durée 24 jours, et la direction de son axe incliné de 75° sur l'écliptique, mais aussi il publie une Carte de Vénus représentant, comme d'une stabilité parfaite, ces apparences pourtant si fugitives.

En réalité, les travaux de Bianchini sont sans valeur démonstrative.

En 1732, J. Cassini discuta l'ensemble des observations de son père et de Bianchini; cette discussion le conduisit à attribuer à Vénus une durée de $23^h 20^m$, voisine de celle de la Terre et de Mars.

A l'époque, cette conclusion fut admise et, pendant cinquante ans, aucun astronome ne s'occupa plus de cette question.

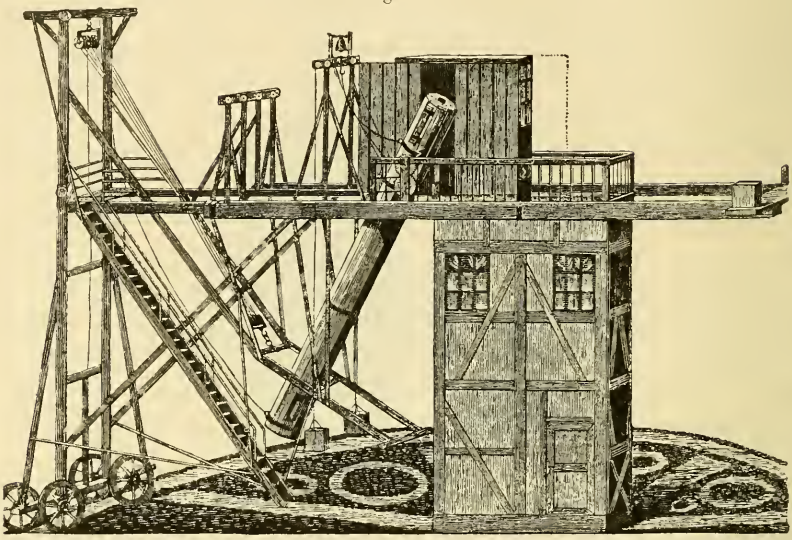
W. Herschel. — Il fallut, pour qu'elle revînt à actualité, que le grand Herschel ait complètement changé le matériel instrumental et substitué aux appareils si incommodes et si incertains employés jusqu'alors des télescopes à la fois très lumineux et de grand pouvoir optique; de 1777 à 1783, cet illustre astronome étudia, à différentes reprises, Vénus avec ses excellents télescopes de 3^m et 6^m de foyer; mais ces observations, basées comme les anciennes sur les taches dont nous avons parlé, et auxquelles il convient cependant d'attacher grande importance, ne purent aboutir à rien de net. « Les taches, dit-il, prenaient trop souvent l'apparence d'illusions d'optique... Cette planète a un mouvement de rotation, mais il est difficile de croire qu'il soit d'une lenteur assez grande pour ne s'accomplir qu'en 24 jours; quant à la position de son axe de rotation, elle est plongée dans une incertitude plus grande encore. »

A la même époque, était en Hanovre, pays originaire d'Herschel, un amateur aussi passionné que lui pour l'Astronomie, Schrœter, d'abord conseiller de justice à Hanovre, puis bailli à Lilienthal (près de Brême) où il avait ses propriétés. Il y avait fondé, de ses deniers, un observatoire, où il eut comme assistants Harding et l'illustre Bessel.

A l'exemple d'Herschel, il y fabriquait ses télescopes et leur monture. Un de ces télescopes avait 9^m de foyer; celui dont se servait

ordinairement Schrœter en avait 7^{m} (*fig.* 10); de 1777 à 1796, cet

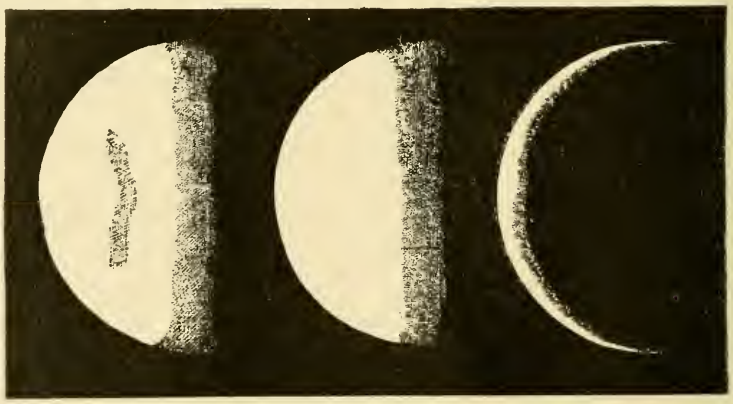
Fig. 10.



Télescope de Schrœter.

astronome s'occupa assidûment de Vénus, qu'il observait surtout

Fig. 11.



Échancrures du croissant de Vénus, d'après Schrœter.

pendant le crépuscule du soir ou du matin. La qualité de ses instru-

ments lui permit de trouver, sur cette planète, un phénomène plus stable que ceux qu'on avait vus jusqu'alors. Il s'agit de troncatures ou déformations des cornes (*fig.* 11), observées par lui, surtout sur la corne australe, lorsque dans ses plus grandes élongations la planète est voisine de la dichotomie. D'après Schrœter, ces apparences seraient produites par l'ombre que projettent dans ces régions de très hautes montagnes (30^{km}) dont l'existence lui parut indubitable par suite de l'apparition à différentes reprises, tout à fait à leur voisinage, d'un point lumineux absolument isolé, séparé du croissant par un intervalle obscur et qu'il pensait correspondre à leur sommet; de leurs retours successifs il déduit une durée de rotation de $23^h\ 21^m$.

Trente ans plus tard, Fraunhofer modifiait à nouveau le matériel instrumental ; aux miroirs métalliques de W. Herschel et Schrœter, trop affectés dans leur forme par les variations de température, il substituait des objectifs achromatiques à foyer relativement court et créait ainsi l'équatorial actuel, si commode et si précis.

De Vico. Durée de rotation. Position de l'axe. — Olbers et Schumacher pensèrent alors à faire servir ce perfectionnement à l'étude de la rotation de Vénus, et firent appel aux astronomes du Collège romain, tout récemment en possession d'un de ces nouveaux instruments ($0^m,17$ d'ouverture, $2^m,40$ de distance focale), pour qu'ils utilisassent leur beau ciel à la solution de ce problème.

Les observations y commencèrent en 1839, sous la direction du P. de Vico, et portèrent, à l'exemple de Bianchini, sur les taches claires ou sombres du disque. Mais on ne se contenta plus de simples dessins consignant, par intervalle de temps évidemment d'une certaine durée, l'impression moyenne de l'observateur sur l'aspect de ces détails fugitifs; mieux armés que leurs prédécesseurs ces astronomes suivirent d'heure en heure, avec le micromètre, ces inégalités de l'éclairement de la planète, ne les perdant pas de vue pendant toute la durée de son séjour au-dessus de l'horizon, notant leurs limites et leur position; et cela est nécessaire, car « dans l'intervalle de 3 ou 4 heures, leur disposition sur le disque est telle qu'elles semblent occuper, à très peu près, les mêmes positions; cependant aucune n'est la même que celle qu'on voyait auparavant; l'observateur qui ne suit pas le mouvement de ces taches d'heure en heure peut donc être facilement persuadé, quoique à tort, qu'elles n'ont eu aucun mouvement ».

Au bout de peu de temps, l'impression bien nette de ces observateurs d'élite fut que « manifestement la rotation de Vénus s'accomplit en moins de 24 heures, que les taches s'avancent d'une manière sensible et d'un mouvement régulier, jusqu'à disparaître, et puis qu'elles reparaissent à leur place, à l'heure voulue, le jour suivant ».

Les astronomes romains poursuivirent leurs observations de 1839 à 1841, et ce avec une telle activité, qu'au bout de la première année l'abbé Palomba, chargé des mesures micrométriques, en avait déjà obtenu le nombre incroyable de onze mille. Les mesures, se rapportant à une même tache, furent combinées pour donner une valeur de la durée de rotation, puis les valeurs individuelles les plus voisines réunies en groupes, dont chacun fournissait une certaine durée moyenne de la rotation; ces durées varient entre $23^h 50^m$ et $23^h 11^m$, différences tenant soit aux mouvements propres des taches observées, soit aux erreurs de leur identification. Comment déduire de cet ensemble la valeur la plus approchée de la durée de rotation ?

De Vico ne donne sur ce point, cependant fort important, d'autre détail que ce qui suit :

« Après les comparaisons les plus soignées qu'il nous a été donné de réaliser, nous avons finalement découvert que la valeur qui se maintenait avec une constance suffisante pendant plusieurs mois et qui par conséquent pouvait être réputée comme étant la plus approchée de la vérité était $23^h 20^m 15^s$.

D'un autre côté, des mesures des grandeurs relatives des ellipses décrites par les taches dans leur mouvement de rotation, aux époques où ces ellipses paraissent avoir la plus grande ouverture, lui ont donné pour inclinaison de l'équateur de Vénus sur l'écliptique la valeur $53^\circ 11' 26''$, valeur qui semble peu probable.

Vogel. — En résumé, l'immense travail des astronomes romains semble avoir prouvé réellement que la période de rotation est voisine de celle de la Terre, mais il n'en donne pas la valeur exacte.

Les choses restèrent en l'état jusqu'en 1871, époque à laquelle l'un des plus vaillants et des plus heureux pionniers de l'Astrophysique actuelle, Vogel, débutait à son observatoire particulier de Bothkamp dans la série presque continue de ses importants travaux. La belle série d'observations de Vénus qu'il y fit, dans les années 1871, 1872 et 1873, en vue de déterminer les éléments de sa rotation, le conduisit

à cette conclusion importante, absolument concordante avec celles de J.-D. Cassini et d'Herschel, à savoir que :

« Il est impossible d'obtenir, par les taches que l'on remarque à la surface de Vénus, aucun résultat ferme et précis en ce qui concerne la durée de rotation et la position de l'axe de rotation de cette planète ».

Objections. — Pour les astronomes de cette époque, qui n'avaient que l'observation directe comme moyen de résoudre la question, un pareil aveu d'impuissance avait peu de chance d'emporter la conviction de tous.

Sous un ciel plus transparent que celui de la Prusse ou de l'Angleterre, un observateur sûr de son acuité de vision et pourvu d'un objectif excellent devait, semblait-il, pouvoir donner tort à cette affirmation pessimiste. C'est ce que pensa l'astronome italien Schiaparelli, directeur de l'Observatoire de Milan, dont le nom faisait autorité depuis sa belle découverte des relations d'origine et de parenté des étoiles filantes et des comètes; mais, avant de parler de ses observations, il convient d'introduire une notion nouvelle.

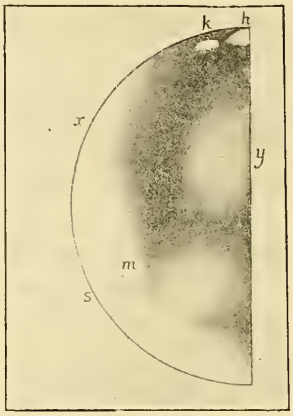
Kirkwood. Les marées internes. — Pour mettre la théorie cosmogonique de Laplace à l'abri de certaines objections très sérieuses, l'astronome américain Kirkwood avait suggéré, en 1864, l'hypothèse suivante :

Par suite des marées, et du frottement qui en résulte, produites par l'attraction solaire sur la masse gazeuse détachée de la nébuleuse solaire pour former la planète, le mouvement de rotation rétrograde qu'avait d'abord cette masse devait peu à peu cesser et alors un mouvement de rotation directe s'établir, la planète tournant alors la même face vers le Soleil et par suite ayant un mouvement de rotation de même durée que son mouvement de translation. Puis, la planète continuant à se condenser, la vitesse de rotation s'accroîtrait, malgré le frottement dû aux marées, jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur que nous lui connaissons actuellement. Il en résultait que, si pour les planètes les plus voisines du Soleil l'action des marées était prédominante, la période d'équilibre subsisterait indéfiniment et que la durée de rotation de la planète serait déterminée par celle de sa translation autour du Soleil.

Revenons maintenant à Schiaparelli.

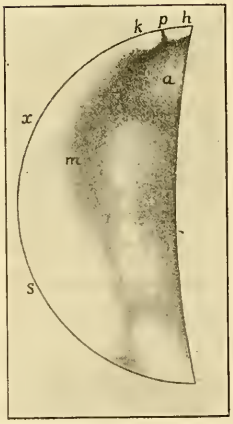
Schiaparelli. — Les premières observations de l'astronome milanais, faites d'abord avec un équatorial de $0^m,24$ et vérifiées plus tard avec un équatorial de $0^m,54$, s'étendent du 5 novembre 1877 au

Fig. 12.



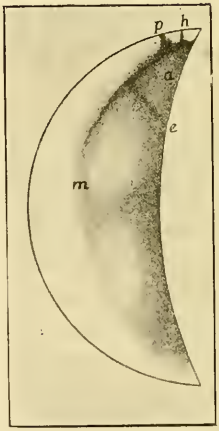
10 décembre.

Fig. 13.



15 décembre.

Fig. 14.



21 décembre.

1er février 1878; elles constituent, pendant cette période, une étude continue de l'aspect physique de la planète alors voisine de sa conjonction inférieure; mais, à l'inverse de ses prédécesseurs de l'obser-

vatoire du Collège romain, il n'accompagna point son étude de mesures de position et la traduisit seulement en une série d'environ 100 dessins, qui comportent deux sortes d'apparences ou taches :

1° Une ombre ou tache triangulaire placée vers le milieu du disque avec un de ses angles tourné vers le Nord (*fig.* 13 et 14);

2° Deux taches ovales, très voisines l'une de l'autre, situées près du bord du disque à la corne australe, taches brillantes et d'aspect tout différent de la première (*fig.* 12).

Jamais, dans le cours de ses observations, qui ont duré parfois plus de 3 heures consécutives, Schiaparelli ne put constater dans aucune d'elles une variation de position sensible; la planète semble rigoureusement immobile.

Holden. — De plus, le 15 décembre 1877, avec l'équatorial de $0^m,66$ de l'Observatoire de Washington, Holden a vu l'une des taches blanches dans la même situation où Schiaparelli la voyait à Milan 8 heures auparavant; les régions voisines de la corne australe de Vénus paraissaient donc avoir conservé le même aspect pendant ces 8 heures.

Étude de Schiaparelli sur Mercure. — Un peu après (1881), et avec les mêmes instruments, l'astronome milanais commença sur Mercure une étude semblable, qu'il poursuivit pendant 8 ans. Mais ici les difficultés sont encore plus grandes que pour Vénus; Mercure ne paraît, en effet, jamais assez séparé du Soleil pour que l'on puisse, sous nos latitudes, l'observer dans la pleine obscurité de la nuit. Et, dans le crépuscule, soit du matin, soit du soir, les observations sont rarement bonnes; la planète est alors toujours près de l'horizon et, par suite des agitations et des réfractions inégales des couches inférieures de l'atmosphère, elle paraît dans la lunette constamment agitée, de sorte que les détails de sa surface sont absolument incertains (1).

On en est donc réduit à faire toutes les observations dans la pleine lumière du jour, par une atmosphère toujours illuminée et la plupart du temps fort près du Soleil, conditions évidemment bien défavorables aussi. Cependant, chose assez curieuse, Schiaparelli cite.

---

(1) A l'œil nu, cet effet se traduit par une forte scintillation; aussi les anciens avaient-ils appelé Mercure *astre scintillant*.

comme l'un de ses meilleurs dessins, celui qu'il fit le 11 août 1882 vers 8^h du matin, alors que Mercure n'était pas distant du limbe solaire de plus de 3°; le disque de la planète était parfaitement rond et à peu près uniformément lumineux.

Malgré ces difficultés, Schiaparelli conclut que le disque de Mercure présente des taches obscures d'un caractère permanent, si bien que, comme Bianchini pour Vénus, il a cru pouvoir en dessiner le planisphère. « Ces taches obscures, dit-il, se présentent sous forme de traînées d'ombre extrêmement légères. Dans les conditions ordinaires, ce n'est qu'au prix de beaucoup de fatigue et avec une grande attention qu'on peut les reconnaître. Dans les meilleures conditions, ces ombres ont une teinte brune et jaune comme la sépia; ce ton se détache toujours très peu sur la couleur générale de la planète, qui d'ordinaire est d'un rose clair tirant sur le cuivre. Il est très difficile de représenter d'une façon satisfaisante des formes ou des bandes si vagues et si diffuses, surtout à cause du peu de précision des contours, qui laisse toujours une place à l'arbitraire. » Toutes ces difficultés n'ont pas rebuté la patience de l'astronome milanais, pas plus que toutes ces causes de doute et d'indécision ne l'ont empêché de conclure d'une façon ferme : il affirme, comme il l'avait fait pour Vénus, que ces traînées d'ombre, plus ou moins visibles, conservent toujours la même position par rapport au terminateur.

La même conclusion s'imposerait donc alors pour les deux planètes quant à leur rotation. Cette immobilité apparente des taches par rapport au terminateur exclut nécessairement toutes les rotations rapides voisines de 24 heures; elle identifie la rotation de la planète avec celle du terminateur, et par suite elle doit, comme cette dernière, se faire autour d'un axe sensiblement perpendiculaire à l'orbite de Vénus en un temps égal à celui de la révolution sidérale de la planète. C'est-à-dire en 225 *jours pour Vénus et* 88 *jours pour Mercure*.

Telle est la conclusion de Schiaparelli, conclusion qui, par son importance au point de vue cosmogonique et son inattendu, fit alors une énorme impression, mais dont la précision, si peu en rapport avec l'indécision des observations, semble avoir surtout pour origine les suggestions théoriques de Kirkwood.

Discussion. — S'il en était ainsi, ces deux planètes tourneraient

constamment la même face vers le Soleil : l'un de leurs hémisphères toujours soumis à son action calorifique (six fois plus intense pour Mercure et deux fois pour Vénus que sur notre globe) serait une véritable fournaise, pendant que l'autre hémisphère serait le siège d'un froid plus intense que celui de nos régions polaires. On a peine à concevoir quelles conditions d'équilibre en résulteraient pour l'atmosphère dense qui entoure la planète Vénus ; il semble que des courants violents doivent alors partir de l'hémisphère froid pour l'hémisphère chaud, mélangeant ainsi les différentes masses de cette atmosphère et l'entretenant dans une perpétuelle et violente agitation. Dès lors, l'aspect de la surface de la planète ne saurait montrer cette apparence de calme à peu près absolu qui fait que, sauf vers le sommet des cornes du croissant, on peut si difficilement préciser un détail différenciant une portion du disque des parties voisines; elle s'explique, au contraire, très aisément avec une rotation voisine de 24 heures qui expose successivement aux rayons solaires toutes les parties de son atmosphère.

Trouvelot, Niesten, Stuyvaert, Perrotin, Antoniadi, Flam-

Fig. 15.

23 mai, 2^h-6^h30^m.

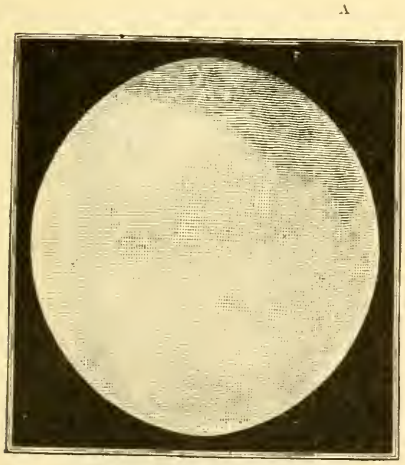
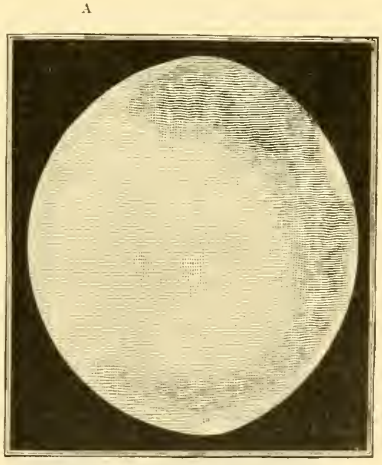


Fig. 16.

24 juin, 2^h-7^h.

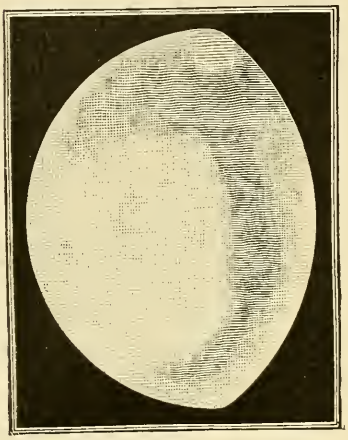


marion. — Aussi, on a cherché, dans nombre d'observatoires, à vérifier la conclusion de l'astronome milanais, et l'on s'est adressé de

préférence à Vénus; tandis que Niesten et Stuyvaert (Bruxelles, 1877-1890) disent avoir souvent constaté la réalité de la rotation

Fig. 17.
15 juillet, $2^h 20^m$-$6^h 30^m$.

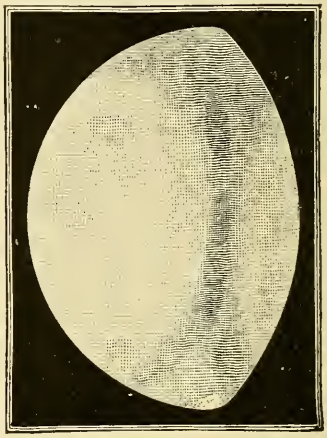
A



B

Fig. 18.
2 août. 2^h-7^h.

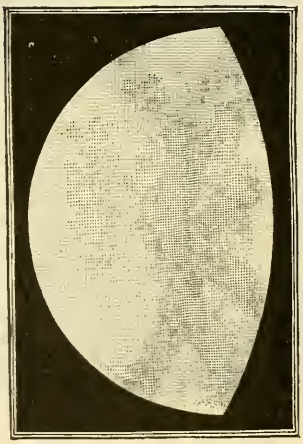
A



B

Fig. 19.
17 août, $4^h 45^m$-7^h.

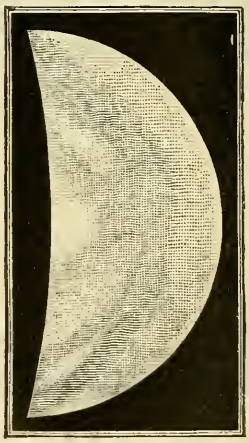
A



B

Fig. 20.
27 septembre, 1^h-5^h.

A



B

diurne, Perrotin (Nice, 1890) conclut formellement à la rotation

lente. Comme celles de Schiaparelli sur Mercure, ses observations ont été faites pendant le jour; elles ont duré du 15 mai au 4 octobre 1890; l'étude attentive des 61 dessins (*fig.* 15, 16, 17, 18, 19 et 20) qui en sont résultés conduit l'auteur à cette conclusion : « L'aspect de la planète ne varie pas sensiblement d'un jour à l'autre, et il reste aussi le même aux diverses heures de la journée. Les modifications, que l'on observe le même jour, se font sans mouvement par le seul effet des variations de l'illumination et de l'absorption atmosphérique avec la hauteur de l'astre sur l'horizon. »

Nouvelles recherches. Schiaparelli, Brenner, Villiger, Barnard. — En 1895, Schiaparelli tire, d'une nouvelle étude de Vénus, la même conclusion qu'en 1878.

Mais, à la même époque, Brenner, de l'observatoire Manora à Lussimpicolo (Istrie), dit avoir démontré de la façon la plus évidente la courte rotation; pendant le mois de juin, en effet, il put nombre de fois « voir très nettement arriver et passer sur le disque des taches bien délimitées qui y revenaient périodiquement chaque jour ». Il conclut à une durée de révolution de $23^h\,57^m\,7^s,5$.

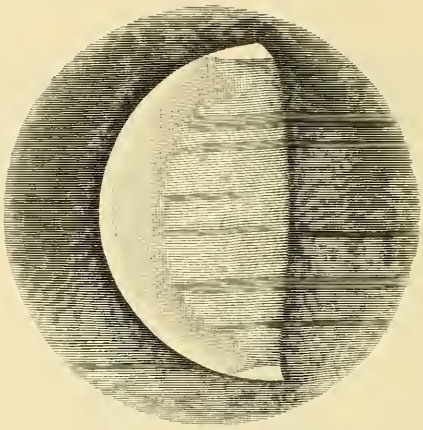
De leur côté, Villiger (équatorial de $0^m,28$ de Munich, 1896), Antoniadi et Flammarion (objectif de $0^m,24$ de Juvisy, 1896-1898), sans donner une valeur précise de la durée, arrivent aussi à une rotation voisine de 24 heures. Enfin, l'habile astronome Barnard dit que, même avec le grand instrument ($0^m,91$) de l'observatoire Lick, il n'a vu qu'une seule fois apparence de tache sur la planète.

Trouvelot. Taches polaires. — La question restait donc tout aussi indécise; sa solution, datant à peu près de la même époque, est due à l'astronome français Trouvelot. Dès le mois de novembre 1877, Trouvelot avait noté sur le contour de Vénus, au Nord et au Sud, près du terminateur, occupant des points diamétralement opposés, deux taches blanches d'un aspect tout particulier [1]. Leur étude assidue, continuée avec beaucoup de soin pendant quinze ans, démontra leur permanence absolue, elles existent toujours sur la planète aux mêmes points (*fig.* 21), et lorsqu'elles disparaissent à nos yeux c'est, ou que

[1] L'une de ces taches, la méridionale, correspond exactement aux taches *k* et *h* (*fig.* 12) que Schiaparelli avait observées pendant un mois en 1878, mais dont il n'avait pas reconnu le véritable caractère de tache polaire.

Vénus est alors trop éloignée pour permettre de les distinguer, ou qu'elles sont envahies par la nuit de la planète.

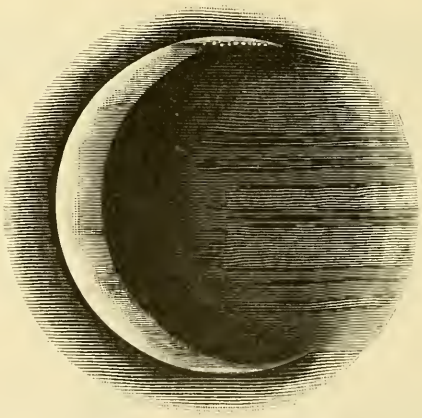
Fig. 21.



13 février 1881.

Quand Vénus, allant vers sa conjonction inférieure, se rapproche graduellement de nous, on voit ces taches gagner en éclat et visibi-

Fig. 22.



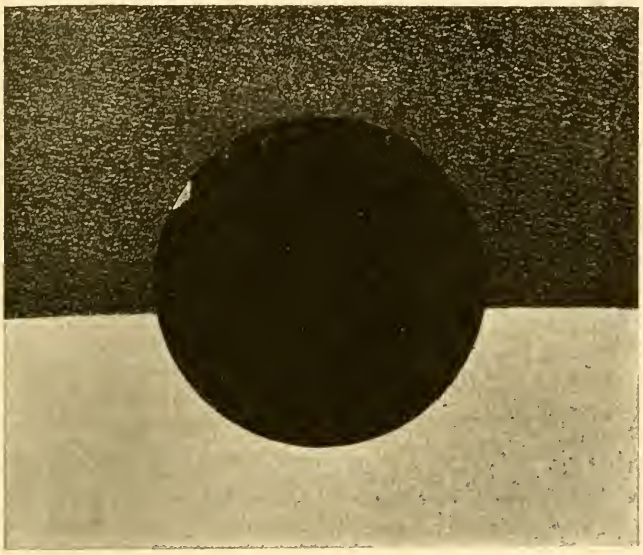
5 février 1878.

lité : « elles se recouvrent sur leur bord interne de pics et d'aiguilles d'éclat éblouissant (*fig.* 22), qui laissent parfois bien loin en arrière

les taches polaires de Mars, et qui réfléchissent la lumière avec une si grande intensité que ce bord apparaît comme tout constellé d'étoiles alignées comme les grains d'un collier de pierres précieuses » ; l'axe de rotation de la planète passe nécessairement par ces points fixes diamétralement opposés. Ces taches sont donc des taches polaires; elles sont absolument analogues d'aspect aux taches polaires de Mars, et formées comme elles et comme les régions polaires de notre globe de masses de glace énormes et de banquises probablement beaucoup plus hautes.

Comme les taches polaires de Mars, celles de Vénus vont en dimi-

Fig. 23.



Vénus avec tache polaire.

nuant progressivement, mais dans une bien moins grande proportion; l'axe de rotation de Vénus est, en effet, moins incliné (12°) que celui de Mars (27°) sur l'axe du plan de l'orbite.

Nous devons ajouter que, quelques années auparavant, lors du passage de Vénus en 1874, Russell, directeur de l'Observatoire de Sydney, et ses collaborateurs Savage et Lenehan avaient, pendant de courts instants à la sortie, constaté l'existence sur le bord sud de la

planète, alors extérieur au Soleil, d'une tache lumineuse très brillante (*fig.* 23) qu'ils ont nettement appelée *tache polaire*.

L'existence de ces deux régions polaires, dont le caractère avait échappé à Schiaparelli, montre la grande analogie qui existe entre Vénus, la Terre et Mars, analogie que confirme encore l'aplatissement $\frac{1}{303}$ très voisin de celui de la Terre, trouvé par MM. Bouquet de la Grye et Arago pour Vénus, et ne permet pas d'attribuer à ces planètes des modes de rotation aussi différents; enfin, Trouvelot, en étudiant de près les dessins de la grande tache grise, en déduit une durée de rotation très voisine de 24 heures.

G.-H. Darwin. — Ces considérations trouvent un appui important dans les conclusions d'un Mémoire fort remarqué de G.-H. Darwin (1880) sur l'évolution du système solaire par l'action des marées internes qu'avait invoquée Kirkwood.

« Si, dit-il, comme on l'a prétendu, le frottement des marées joue un rôle si important dans l'histoire de la Terre et de la Lune, on pourrait s'attendre à ce que cela soit vrai également pour les autres planètes et satellites et pour les planètes elles-mêmes dans leur rapport avec le Soleil. Mais, pour chacun de ces cas, le calcul montre péremptoirement qu'il n'en a pas pu être ainsi. Le rapport de la Lune avec la Terre est tout à fait exceptionnel dans le système solaire, et pour expliquer les caractères principaux de celui-ci nous devons encore avoir recours à des théories comme celles de Laplace. »

Méthode spectroscopique. Belopolsky, Lowell et Slipher. — A la même époque Belopolsky pensait à faire servir la méthode spectroscopique à l'étude de la rotation de Vénus : en lui supposant, en effet, une durée de 24 heures, chacun des bords de l'équateur de Vénus tourne avec une vitesse linéaire de $0^{km},5$, correspondant à un déplacement des raies du spectre certainement appréciable, avec le bel instrument (équatorial de $0^{m},91$ et spectroscope à température constante) dont disposait l'astronome de Pulkowa.

Les observations faites par lui, du 25 mars au 13 mai 1900, lui donnèrent en moyenne pour valeur de la vitesse

$$v = 0^{km},9 \text{ par seconde} \pm 0^{km},1,$$

ce qui correspond à une durée de rotation d'environ 12 heures.

Deux ans après, Lowell et Slipher reprirent ces recherches avec l'équatorial de $0^m,56$ de l'Observatoire de Flagstaff, dans l'Arizona; leurs résultats sont tout différents :

$$v = 0^{km},015,$$

correspondant à une durée de rotation d'environ 30 jours.

La méthode spectroscopique, d'ailleurs d'une application fort délicate ici, laisse donc la question indécise.

Conclusion. — Mais les faits que nous avons cités plus haut sont assez concluants pour nous permettre une opinion ferme. *Les durées de rotation de Mercure et de Vénus sont comme celles de la Terre et de Mars voisines de 24 heures.*

Les observations de Vénus faites récemment (31 août, 2, 3 et 4 septembre 1906) au sommet du mont Blanc par MM. Hansky et Stéphanik, dans des conditions atmosphériques excellentes et avec des images d'une stabilité parfaite, confirment d'ailleurs cette conclusion. Les apparences, que ces observateurs ont constatées, leur font, en effet, attribuer à Vénus une rotation un peu plus rapide que celle de la Terre.

Température de Vénus et de Mercure.

Connaître la température moyenne à la surface de ces deux planètes semble *a priori* un problème presque insoluble : il a cependant tenté un physicien anglais, M. le professeur Poynting, de l'Université de Birmingham, et, quoique n'étant évidemment qu'approximatifs, les chiffres qu'il donne n'en sont pas moins dignes de notre attention. Ces travaux ont pour base, outre la loi bien connue de Stéphan, les hypothèses suivantes :

1° La planète tourne autour d'un axe perpendiculaire au plan de son orbite;

2° L'effet de l'atmosphère est de conserver à une latitude donnée l'égalité de température entre le jour et la nuit;

3° En chacun de ses points l'atmosphère fonctionne comme un radiateur absolu, c'est-à-dire qu'elle absorbe et ensuite émet tous les rayons qu'elle a reçus, quelle que soit leur longueur d'ondulation;

4° Il n'y a aucun transport convectionnel de chaleur d'une latitude à une autre;

5° La réflexion en chaque point est le dixième de la quantité reçue;

6° La planète rayonne à l'extérieur toute la chaleur qu'elle reçoit du Soleil, ni plus ni moins.

Si l'on compare ces hypothèses à ce que nous savons de la Terre, la troisième seule diffère et même beaucoup de la réalité, sans que nous ayons aucun moyen d'en mesurer l'écart. Les autres sont au contraire sensiblement appropriées au régime de notre globe, ou n'ont aucune influence appréciable sur le résultat final.

Étant donnée cette planète idéale, M. Poynting calcule la température moyenne qui y régnerait aux différentes latitudes, si elle occupait dans le système solaire la position de la Terre, et enfin, ce sont les seuls chiffres que nous retiendrons, la température moyenne qu'elle aurait aux distances moyennes des différentes planètes; les voici pour Mercure, Vénus et la Terre :

Mercure	193° C.
Vénus	66° C.
La Terre	16° C.

Pour la Terre cette valeur ne s'écarte que d'environ 10° de la réalité; c'est la seule donnée de contrôle que nous ayons, mais elle est importante. Elle nous permet, en effet, d'avoir une certaine confiance dans les deux autres résultats et d'y trouver, par leur écart considérable, une nouvelle indication de la grande différence qui existe, au point de vue physique, entre les surfaces des deux planètes intérieures Mercure et Vénus.

CHAPITRE II.

MARS.

I. — Données générales sur cette planète.

Il n'est point de planète supérieure dont l'éclat apparent soit aussi variable que celui de Mars : c'est une conséquence de la grande variabilité relative de sa distance à la Terre.

Dans certaines oppositions, circonstances les plus favorables à son observation, Mars est, en effet, à son périhélie en même temps que la Terre est à son aphélie, et sa distance à la Terre se réduit alors à 0,37 correspondant au diamètre apparent considérable de 24″,71 et à une grandeur stellaire de $-2^{gr},8$, bien supérieure à celle de Sirius; quoique moins éclatante alors que Vénus à son maximum d'éclat, elle frappe plus les yeux par le feu rougeâtre intense qu'elle émet. Dans certaines conjonctions, au contraire, où la planète est à son aphélie en même temps que la Terre à son périhélie, cette distance peut s'élever jusqu'à 2,68, correspondant à un diamètre apparent sept fois moindre 3″,35, et à une grandeur stellaire de $1^{gr},6$, égale à celle de α Lion et α Gémeaux. Son éclat est alors soixante fois moindre que dans le premier cas. Ces variations d'éclat sont évidemment périodiques comme les situations relatives des trois corps Soleil, Mars et Terre qui les déterminent.

Ajoutons à cela que Mars présente des phases (pressenties par Galilée en 1610), petites à la vérité, mais qui n'en diminuent pas moins parfois son éclat apparent du dixième de sa valeur; on dit, depuis W. Herschel, qu'alors Mars est *gibbeux*.

Pas plus que les planètes précédentes, Mars n'est donc lumineux par lui-même : il ne nous est, lui aussi, visible que par réflexion de la lumière qu'il reçoit du Soleil, lumière dont il ne nous renvoie d'ailleurs que le quart (albedo de Mars : 0,250).

Taches sombres de Mars; Fontana. Sa rotation, son aplatissement; J.-D. Cassini, W. Herschel. — D'autre part, à l'inverse de Vénus et de Mercure, cette planète montre des inégalités d'éclairement marquées et fort nettes; en d'autres termes, son disque est en partie occupé par des taches sombres très apparentes et stables dont Fontana, Zucchi et Bartoli signalèrent presque simultanément l'existence (1636-1644). Plusieurs fois quelques-uns de ces astronomes avaient constaté leur disparition aux places où ils les avaient antérieurement observées sur le disque; mais J.-D. Cassini découvrit le premier que ces disparitions et réapparitions étaient périodiques et régulières, se succédaient dans un ordre constant d'Occident en Orient, indiquant ainsi une rotation de la planète sur elle-même, dont il estima la durée à $24^h 40^m$.

Quant à la direction de l'axe autour duquel s'effectue cette rotation, nos premières données sont dues à W. Herschel et résultent de la longue série d'observations qu'il fit sur Mars de 1777 à 1783. D'après cet illustre astronome l'équateur martien serait un peu plus incliné (28°42′) que celui de la Terre (23°27′) sur le plan de l'écliptique; et de plus, ce qui est d'ailleurs une conséquence forcée de ce mouvement de rotation, Mars aurait comme la Terre la forme d'un ellipsoïde dont le petit axe coïnciderait avec son axe de rotation. Ces différentes données ne sont d'ailleurs évidemment qu'approximatives.

Beer et Mædler, Schmidt. — L'étude de la durée de rotation a été reprise par Beer et Mædler [1] à Berlin, lors des oppositions de 1830, 1832 et 1837, et les a conduits au nombre $24^h 37^m 20^s,4$; mais la valeur que nous considérons aujourd'hui comme la plus probable,

$$24^h 37^m 23^s,$$

résulte des travaux récents de Schmidt, où il compare ses observations de 1845 à 1873 à celles d'Huygens (1672).

C'est la valeur en temps moyen de la durée d'un jour sidéral de Mars; et, comme son mouvement moyen diurne est de $2^m 12^s,0$, le

---

[1] Beer, riche banquier de Berlin et grand amateur d'Astronomie, avait installé près de cette ville un observatoire privé dont l'instrument principal était un équatorial de $0^m,20$ de Fraunhofer; il eut la bonne fortune de pouvoir y attacher J.-H. Mædler, alors professeur privé à Berlin, et qui devint plus tard l'un des astronomes les plus distingués de l'Allemagne.

jour solaire de Mars a une durée de $24^h 39^m 35^s,7$. L'année de Mars se compose donc de 668 $\frac{1}{3}$ de ces jours.

Axe de rotation; Oudemans. — D'un autre côté, le travail très complet de réduction des anciennes observations héliométriques de Bessel a conduit Oudemans à admettre comme valeur la plus probable de l'inclinaison du plan de l'équateur de Mars sur l'écliptique

$$28^\circ 51',$$

tandis que M. Lowell a déduit, de ses mesures (1901-1903) sur le pôle nord de la planète, la valeur $22^\circ 55'$, qui semble peu probable.

II. — Climatologie de Mars.

Les analogies que nous avons indiquées entre Mars et notre globe, aussi bien que son voisinage de nous, ont engagé les astronomes à comparer son régime climatérique à celui de la Terre. Les différences entre ces deux régimes sont assez sensibles et résultent, d'une part, de la plus grande inclinaison de l'équateur de la planète sur le plan de son orbite et, d'autre part, de la grande valeur relative de l'excentricité de celui-ci.

En raison de la première cause, l'inégalité des jours et des nuits est bien plus prononcée sur Mars à la même latitude que sur la Terre; ainsi, à la latitude de 45°, la durée du jour le plus court est (en heures terrestres) de $7^h 56^m$ pour Mars et de $8^h 43^m$ pour la Terre; tandis que le jour le plus long dure $17^h 5^m$ sur Mars et $15^h 38^m$ sur la Terre, soit une différence de $9^h 9^m$ pour Mars et seulement de $6^h 55^m$ pour la Terre. Les écarts des températures extrêmes diurnes sont donc, toutes choses égales d'ailleurs, beaucoup plus grands sur Mars que sur notre globe.

L'effet de l'excentricité sur les durées des saisons est tout aussi important. Dans l'hémisphère nord, par exemple, le printemps dure 191 jours martiens, l'été 181, l'automne 149 $\frac{1}{3}$ et l'hiver 147. Ces durées sont évidemment les mêmes pour l'hémisphère sud; mais l'été de l'hémisphère nord correspond à l'hiver de l'hémisphère sud et son printemps à l'automne de ce dernier. Sur l'hémisphère nord de Mars le printemps dure donc 44 jours de plus que l'hiver, tandis que

pour le même hémisphère terrestre la différence des durées de ces saisons n'est que de 4 jours, c'est-à-dire dix fois moindre. Aussi, la différence entre les climats des deux hémisphères de Mars est-elle beaucoup plus considérable que sur la Terre; l'hiver de l'hémisphère nord est de courte durée par rapport à celui de l'hémisphère sud; tandis qu'au contraire, l'automne de l'hémisphère sud est bien plus long que celui de l'hémisphère nord. En outre, par suite des variations de distance au Soleil dues à la forte excentricité de l'orbite, l'été de l'hémisphère sud, plus court que celui de l'hémisphère nord, sera en même temps beaucoup plus chaud.

Calottes polaires de Mars; Huygens, Maraldi. — Cette étude est d'autant plus intéressante que, peu après la découverte de la rotation de Mars, des analogies nouvelles avec la Terre furent reconnues.

En 1672, Huygens signala ce fait important que le pôle sud de Mars correspondait à une tache blanche circulaire et le couvrant comme par une sorte de calotte brillante; un peu plus tard Maraldi constata la même apparence au pôle nord. Pour ces deux astronomes, aussi bien que pour W. Herschel qui en reprit l'étude avec ses grands instruments, ces apparences révèlent la présence, sur les régions polaires de Mars, d'amas de glace ou de neige qui en forment la partie superficielle, et pour eux il y a assimilation complète à ce que nous voyons dans les régions polaires de notre globe : cette induction remarquable fut confirmée par les longues séries d'observations que Beer et Mædler firent sur cette planète lors des oppositions de 1830, 1837 et 1839 et dont voici les résultats les plus importants.

Beer et Mædler. — La couleur de ces taches est absolument blanche et la matière qui les constitue est certainement d'autre nature que le reste du disque; car, étant donné leur éclat, qui les fait la plupart du temps paraître débordant le disque et comme renflées, leur albedo doit être considérable par rapport à l'albedo moyen de l'ensemble du disque. D'autre part, les dimensions de ces calottes polaires varient très régulièrement suivant la marche des saisons martiennes, leur largeur allant en diminuant et la calotte se rétrécissant progressivement à mesure que l'observation s'éloigne du solstice d'été martien correspondant à l'hémisphère observé. Après Beer et Mædler, nombre d'astronomes ont fait de l'étude de Mars l'objet de

leurs veilles, si bien que, depuis une trentaine d'années, toutes les oppositions de cette planète sont attentivement suivies, minutieusement étudiées, et qu'en particulier l'on s'attacha à obtenir des mesures de plus en plus exactes des dimensions successives de ces calottes polaires.

Barnard, Lowell. — Nous donnons ici les résultats moyens des mesures micrométriques très concordantes du diamètre de la calotte polaire sud, faites par Barnard à l'observatoire Lick pendant les oppositions de 1892 et 1894 (1); dans ce Tableau, J indique le nombre de jours comptés à partir du solstice, positivement après lui, négativement avant, et D désigne le diamètre de la calotte polaire exprimé en fraction du diamètre équatorial de Mars.

J.	D.	J.	D.	J.	D.
—100	0,307	—45	0,150	+10	0,056
95	0,301	40	0,136	15	0,052
90	0,291	35	0,124	20	0,048
85	0,277	30	0,113	25	0,044
80	0,263	25	0,103	30	0,042
75	0,249	20	0,094	35	0,039
70	0,234	15	0,086	40	0,038
65	0,216	10	0,078	45	0,034
60	0,200	— 5	0,071	50	0,032
55	0,183	0	0,064	55	0,029
— 50	0,165	+ 5	0,060	60	0,027
				65	0,026
				+70	0,025

Les nombres de ce Tableau sont représentés dans les courbes de la figure 24 et les aspects successifs de la calotte polaire australe tels qu'ils résultent des dessins de Barnard reproduits dans la figure 25.

Au commencement du printemps austral de Mars la calotte polaire s'étendait sur une surface d'environ 945000$^{km^2}$ et son diamètre était à peu près le tiers de celui de la planète ; à partir de là il a été en diminuant progressivement, non seulement jusqu'au solstice d'été, mais jusqu'au 19 novembre 1894, 80 jours après le solstice d'été, époque à

(1) En 1892 on s'est servi de l'équatorial de $0^m,30$ et en 1894 de celui de $0^m,92$. La concordance, dans les deux oppositions, des valeurs de ce diamètre, à distance égale du solstice d'été martien, montre bien que ses variations sont un phénomène absolument régulier dont la loi est constante.

laquelle la calotte avait complètement disparu. Il fut impossible à Barnard de la revoir jusqu'au 12 mai 1895, 73 jours martiens avant le solstice d'hiver suivant.

Fig. 24.

Courbe de variation de l'étendue de la calotte polaire australe.

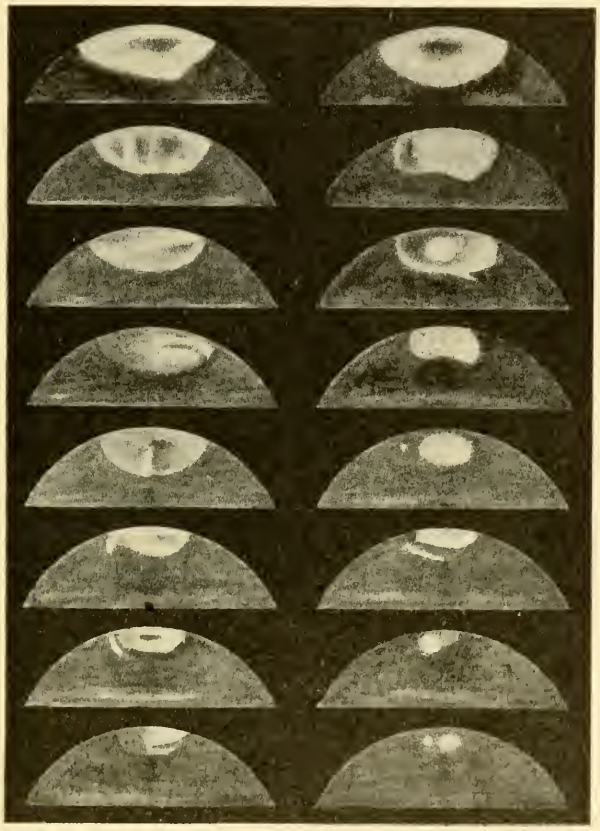
Détail fort important, signalé par Lowell à la même époque [1]: pendant sa diminution graduelle, la calotte polaire se borde peu à peu d'une bande nettement bleue, à contours irréguliers, d'autant plus large en moyenne que la diminution de la calotte est plus rapide et qui se retire avec elle vers le pôle en formant autour d'elle comme une frange continue. Or, et c'est là qu'est l'importance de l'observation de Lowell, la lumière provenant de cette zone bleue est polarisée, et par conséquent la substance qui nous la renvoie est liquide.

La calotte polaire australe est mieux connue que l'autre par suite de sa position plus favorable pour l'observation lors des oppositions où la distance de Mars à la Terre est la plus faible. Mais les études que l'on a faites de la calotte boréale, et en particulier celles de Flammarion et Antoniadi lors de l'opposition de 1898, montrent que sa diminution suit une loi dépendant d'une façon absolument analogue de l'éloignement au solstice d'été; avec cette différence, tou-

[1] L'astronome américain Lowell, ému par les curieuses assertions de Schiaparelli sur Mars, venait de fonder (1893) dans l'Arizona (Nouveau-Mexique) un observatoire, qu'il a appelé l'Observatoire de Flagstaff, destiné spécialement à l'étude de cette planète. Situé à 2210^{m} d'altitude, au centre d'un plateau fort étendu, ce poste d'observation est remarquable par la pureté, la sécheresse et le calme presque constant de son atmosphère.

tefois, qu'elle n'a point complètement disparu et qu'au moment où son observation est devenue impossible, elle occupait encore un sixième de la surface qu'elle avait au début.

Fig. 25.



Étendues successives de la calotte polaire australe de Mars, d'après Barnard.

Ces calottes indiquent les neiges polaires de Mars. — Tous ces faits s'expliquent aisément si l'on admet que les calottes polaires sont des amas de glaces ou de neiges qui, accumulés dans les hivers, fondent, et de plus en plus vite, dès qu'après être atteints par les rayons solaires, ils les reçoivent ensuite de moins en moins obliquement. L'eau de fusion, provenant de ces glaces ou glaciers, forme

autour de chacun des pôles une mer bleue et polarisante, dont les limites inférieure et supérieure remontent peu à peu vers le pôle, et dont les contours sont forcément irréguliers ; dans l'hémisphère sud, dont les étés sont plus chauds, la calotte peut disparaître complètement; dans l'hémisphère nord, au contraire, la fusion sera plus lente et la plupart du temps incomplète.

Atmosphère de Mars. Analogies avec la Terre. — L'eau provenant de cette fusion donne par évaporation naissance à une atmosphère protectrice qui, semblable à celle de la Terre, quoique probablement moins dense, ainsi que l'indique son faible albedo, fait comme elle office de cloche conservatrice de la chaleur solaire et prolonge la fusion de la neige bien au delà du solstice d'été; puis par condensation, si elle est assez dense, elle reformera la calotte polaire l'hiver martien suivant ([1]).

D'un autre côté, la fusion de la calotte est continue; et, tout au moins jusqu'au solstice, il n'y a pas de retour en arrière, pas de recongélation : la température moyenne diurne sur Mars ne saurait donc être bien différente de celle que nous constatons en moyenne à la surface de notre globe.

Ajoutons que, depuis plus d'un siècle, le centre de la calotte polaire australe (et probablement aussi de la boréale) a conservé sur la planète une position invariable, d'ailleurs un peu distante de son pôle géographique.

III. — Géographie de Mars.

Venons maintenant à la description générale de la surface de la planète, c'est-à-dire à son étude géographique, qu'on appelle *aréographie*.

Nous sommes à cet égard assez limités.

En effet, à cause de l'éloignement de cette planète, ainsi que du peu d'étendue de ses phases, et quelle que soit d'ailleurs sa topogra-

---

([1]) Cette atmosphère est cependant parfois traversée par des nuages dont quelques-uns cachent momentanément la calotte soit en tout, soit en partie.

Nous avons de la présence de la vapeur d'eau dans l'atmosphère de Mars une preuve plus directe : lors de sa mémorable expédition de 1867 au sommet de l'Etna, M. Janssen l'a en effet démontrée spectroscopiquement, en ajoutant toutefois que cette vapeur devait y être en quantité faible.

phie réelle, la surface de Mars est pour nous absolument de niveau, et son étude doit se borner à la détermination des limites et des positions des portions relativement sombres et claires entre lesquelles elle se partage, ainsi qu'à leur description. Mais, même réduite à ces termes, elle ne manque pas d'intérêt, car ces différences d'éclat correspondent évidemment, pour celles qui sont stables et qui, par suite, appartiennent à la surface de Mars, à des différences de pouvoir réfléchissant et de constitution physique des portions correspondantes; une pareille étude est d'ailleurs une œuvre de longue patience; en effet, les seules portions du disque de Mars que nous puissions bien définir sont ses portions centrales, dont les grandeurs relatives ne sont point altérées; plus près du bord, les taches voient l'une de leurs dimensions diminuer progressivement par l'effet de la perspective; elles ne se montrent plus sous leur forme véritable et deviennent bientôt méconnaissables et même invisibles. L'existence de l'atmosphère, imparfaitement diaphane, de Mars augmente encore la difficulté près des bords en égalisant alors les éclats des différentes parties de ces régions en même temps qu'elle les assombrit.

Cartes de Mars. W. Herschel, Beer et Mædler. — Malgré ces difficultés, W. Herschel n'hésita pas à construire une Carte de cette planète, Carte qui n'a plus aujourd'hui qu'une valeur historique.

Un demi-siècle plus tard, alors que le mode de construction des équatoriaux avait rendu les mesures micrométriques faciles et commodes, Beer et Mædler utilisèrent leurs belles observations (1828-1836) pour obtenir une représentation graphique de Mars : ils en publièrent deux mappemondes, l'une donnant les projections des deux hémisphères sur l'équateur, l'autre les projections sur un méridien. Dans ces Cartes, l'origine des longitudes aréographiques, ou méridien initial, est donnée par une petite tache sombre constante qui, signalée d'abord par Schrœter, a été revue par tous ceux qui depuis ont étudié Mars, et qui est incontestablement un point fixe du sol de la planète : c'est l'origine généralement adoptée aujourd'hui.

Kaiser, Dawes, Flammarion. — Les oppositions de 1862 et de 1864 furent l'occasion de nouvelles études.

A Leyde, l'astronome Kaiser fit, avec un équatorial de $0^m,19$ d'ouverture, un très grand nombre de mesures micrométriques, à l'aide

desquelles il obtint 412 dessins de Mars reproduisant les parties successives de son globe qu'il nous offre par suite de sa rotation, dessins et mesures dont il se servit pour obtenir un planisphère de Mars représentant l'ensemble de ses taches permanentes.

En Angleterre, le révérend Dawes, si connu pour ses mesures d'étoiles doubles et la loi optique qui porte son nom, obtint aussi, pendant l'opposition de 1864, une série de nombreux dessins qui servirent à Proctor pour tracer une Carte plus complète que les précédentes.

Enfin, à la même époque, Flammarion, en France, tenta de représenter l'ensemble des observations faites sur Mars depuis l'origine : pour construire cette Carte, il utilisa près d'un millier de dessins, dont les premiers datent de 1636 et dont les principaux sont dus à Huygens, Herschel, Schrœter, Beer et Mædler, Secchi, Lockyer, lord Rosse, Green et Knobel. Enfin, vinrent plus tard (1881 et 1886) les Cartes de Schiaparelli, basées sur ses seules observations.

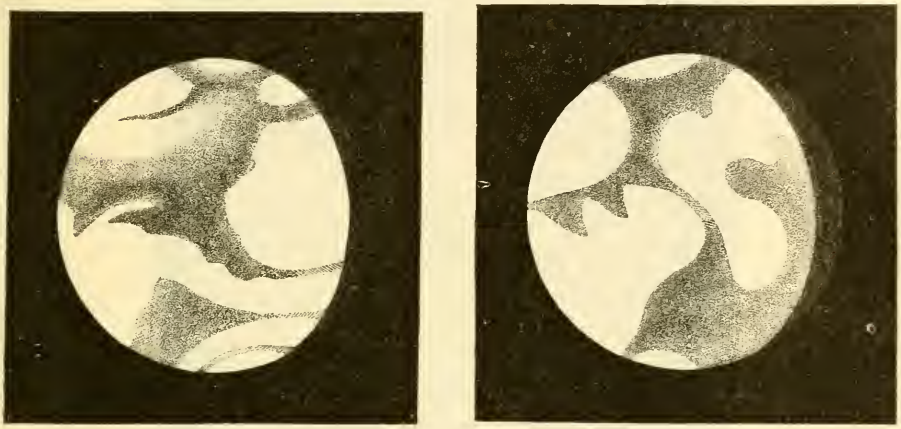
Mers et continents de Mars. — Il y a entre toutes ces Cartes des différences considérables qui s'expliquent aisément : si certaines taches s'imposent à tous par leur netteté de limitation et l'inégalité de leur éclat avec leur entourage, il n'en est point ainsi pour beaucoup de détails, atteignant la limite de visibilité, et dont la vision très nette et certaine dépend de la qualité de l'objectif, de l'acuité de vision de l'observateur, du calme et de la transparence de l'atmosphère : néanmoins, elles se ressemblent beaucoup dans leurs parties essentielles. Disons-en quelques mots : malgré le peu d'eau qui doit exister sur cette planète et influencé par la terminologie adoptée pour la Lune, où il n'y en a certainement pas, on a divisé la surface de Mars en *mers* et *continents;* les premières correspondent aux taches plus sombres avec une couleur gris bleuâtre, les autres aux taches plus brillantes et d'une teinte rougeâtre ou rouge jaunâtre; en outre, des mers partent quelques bandes sombres, sinueuses, plus ou moins étroites, se trouvant en général au sein des continents, que l'on a dénommées *fleuves*.

Beer et Mædler avaient désigné par des numéros d'ordre ces mers et ces continents hypothétiques : Kaiser, Proctor et, après eux, Green et Flammarion leur ont donné des noms d'astronomes célèbres; puis Schiaparelli les rebaptisa, pour la plupart, de noms mythologiques: c'est cette dénomination qui prévaut aujourd'hui.

Aspect d'ensemble de Mars. — Nous n'entrerons pas dans plus de détails sur ces travaux; nous nous contenterons d'en donner le résultat général tel que l'a indiqué le P. Secchi en 1870 à la suite d'observations faites avec l'équatorial de Vico ($0^m,17$).

Quel que soit l'hémisphère que, par suite de sa rotation, cette planète offre à nos regards, son aspect est toujours sensiblement le même (*fig.* 26 et 27). Sur un fond d'éclairement uniforme et généralement

Fig. 26. Fig. 27.



Aspect de la surface de Mars, d'après Secchi.

rougeâtre se trouvent des régions bleuâtres ou bleu verdâtre plus étendues et plus nettement limitées sur l'hémisphère austral que sur l'hémisphère boréal, mais toujours d'éclairement à peu près uniforme.

D'après une curieuse remarque de Beer et Mædler, ces taches stables et étendues, qui représenteraient les mers de Mars, se voient avec moins de netteté pendant l'hiver de l'hémisphère auquel elles appartiennent que pendant son été, ce qui indiquerait une atmosphère plus brumeuse dans la première saison.

C'est le même aspect d'ensemble qu'a constaté E. Barnard avec le grand équatorial ($0^m,91$) de l'observatoire Lick, au sommet du mont Hamilton; mais la grande luminosité des images focales permet d'y signaler certains détails, invisibles avec l'objectif de Vico. C'est ainsi (*fig.* 28) que le dessin de Barnard du 2 septembre 1904 et relatif à l'hémisphère austral nous montre, distribuées d'ailleurs très irrégu-

lièrement sur le disque, des taches obscures dont quelques-unes, de forme presque circulaire, se détachent nettement sur le fond lumineux de celui-ci et sont reliées parfois entre elles par une fine traînée sombre.

Fig. 28.

Aspect de la surface de Mars, d'après Barnard.
2 septembre 1904.

Il convient de noter ici que, depuis l'annonce faite par Schiaparelli des apparences singulières dont nous allons parler plus loin (canaux de Mars), un certain nombre d'astronomes, étudiant la planète Mars avec des instruments de puissance optique de même valeur que celle de l'instrument employé par le P. Secchi, ont donné de sa surface des représentations bien différentes de celle de ce célèbre astronome, ainsi que le montrent les dessins ci-joints, dus à MM. Antoniadi et Flammarion (*fig.* 29 et 30) et obtenus avec l'équatorial de $0^m,24$ de l'Observatoire de Juvisy.

Certaines régions de Mars sont, en outre, le siège d'apparences spéciales.

Fig. 29.

Fig. 30.

1° *Montagnes polaires de Mars.* — Ainsi que l'a constaté le premier Mitchel en 1845, fait confirmé par Green en 1877, on voit à chaque année martienne apparaître, sur le bord du disque, et au voi-

sinage de la calotte polaire alors visible, des taches brillantes, aussi brillantes que la calotte elle-même et en paraissant d'abord la continuation; mais bientôt la calotte ayant diminué d'étendue par suite de sa fusion, on continue à les voir loin de son bord dans les mêmes situations sur le disque.

Pour Green, ces apparences prouvent l'existence, dans les régions polaires de Mars, de hautes montagnes sur lesquelles la neige durerait plus longtemps que dans les vallées voisines.

2° *Nuages de Mars.* — Si l'aspect général de Mars, tel que nous venons de le décrire, est sensiblement constant, il n'en est pas de même des détails qui s'ajoutent à lui et le complètent. Maintes fois on a noté sur eux des changements rapides.

Fig. 31.

Mars, 6 juillet 1890, J.E.K. Dessin de Keeler.

Très nets à un moment donné, ces détails s'estompent par leurs bords, deviennent flous et même disparaissent entièrement à l'observateur, puis, par une suite inverse de transformations, reprennent leur netteté de contours primitive.

Dès leur constatation, on a attribué ces modifications rapides d'aspect au passage de bourrasques dans les régions de l'atmosphère mar-

tienne où elles se produisent, mais longtemps sans aucune preuve directe. C'est en 1890 (5 et 6 juillet) qu'une belle observation de Keeler avec le grand équatorial du mont Hamilton l'a apportée.

Il a pu alors constater, de la façon la plus certaine, l'existence (*fig.* 31), sur le bord du terminateur et se prolongeant nettement au delà de lui d'au moins un ou deux dixièmes de seconde d'arc, de renflements brillants, de couleur et d'éclat comparables à ceux de la calotte polaire australe. Il s'agit donc ici de phénomènes s'élevant au moins à 30^{km} ou 40^{km} au-dessus de la surface de la planète.

L'observation de Keeler a d'ailleurs été bientôt confirmée (juillet 1892) par Perrotin avec la grande lunette de Nice et depuis, à la plupart des oppositions, par nombre d'observateurs (Douglass à l'Observatoire Lowell, Flammarion à Juvisy, etc.) avec des instruments de dimensions beaucoup moindres.

Quelle est la cause de ces curieuses apparences? On ne peut guère les attribuer qu'à des nuages élevés flottant dans l'atmosphère martienne : mais, alors, par quel mécanisme se tiennent-ils en équilibre à des hauteurs aussi considérables et hors de toute comparaison avec celles auxquelles les nuages nous ont habitués sur la Terre?

Canaux de Mars. Schiaparelli. — Revenons maintenant à l'étude physique de la surface de Mars; Schiaparelli va, en effet, la lancer dans une voie toute nouvelle. Ses premiers travaux sur Mars datent de l'opposition de 1877, où cette planète se trouvait presque à son maximum de proximité de la Terre.

Il profite de ces circonstances favorables pour chercher à obtenir des positions exactes des différents accidents que présente la surface. 42 points principaux sont repérés trigonométriquement, et en même temps un grand nombre de détails, jusque-là inconnus, sont signalés; en particulier, il découvre un très grand nombre de nouveaux fleuves, d'ailleurs moins larges que les anciens et généralement plus longs.

Ajoutons qu'un certain nombre de ces apparences nouvelles ont été vues, à la même époque, tout à fait indépendamment de Schiaparelli, par Burton et Dreyer, et tracées par eux sur leur Carte, publiée en 1879.

En 1879, nouvelles études de l'astronome milanais; il repère cette fois 114 points principaux et en même temps signale l'existence de nombreux nouveaux fleuves s'ajoutant à ceux de 1877; ils s'amin-

cissent encore par rapport à eux. Mais les dessins de Schiaparelli, relatifs à cette opposition, donnent lieu à deux remarques capitales :

1° Tous les fleuves nouveaux, aussi bien ceux de 1877 que ceux de 1879, y sont indiqués, sauf quelques rares exceptions, comme *rectilignes*.

2° Au lieu de se terminer à l'intérieur des *continents*, comme dans les dessins de 1877, ils sont tous prolongés jusqu'à la tache sombre la plus voisine, reconnue existante depuis longtemps.

Ces lignes sombres reliaient donc ensemble deux mers et il n'était plus possible de les considérer comme des fleuves.

Continuant, bien à tort d'ailleurs, la terminologie adoptée avant lui, il les appela, en conséquence, des *canaux*.

L'astronome milanais continue ses études sur Mars jusqu'en 1889, et ses observations ultérieures lui parurent non seulement confirmer mais, de plus, étendre considérablement à cet égard ses résultats antérieurs ; si bien que, dans son Mémoire définitif, il affirme l'existence de 82 canaux, qu'il dessine et auxquels il donne des noms.

Il alla d'ailleurs beaucoup plus loin, comme nous le verrons bientôt.

En résumé, dès l'opposition de 1879 et plus affirmativement encore après celle de 1882, Schiaparelli décrit la surface de Mars comme se composant de larges parties sombres, les mers (*fig.* 32) (cette figure donne une projection polaire de l'hémisphère boréal) reliées entre elles à travers le fond brillant figurant les continents par un très grand nombre de lignes sombres assez étroites, de largeur uniforme, rectilignes, de longueurs toujours considérables, de directions quelconques, s'entrecroisant, se joignant et formant à leurs points de croisement comme de petites taches rondes un peu plus sombres que les lignes elles-mêmes. Ces taches de croisement, il les appelle nécessairement des *lacs*.

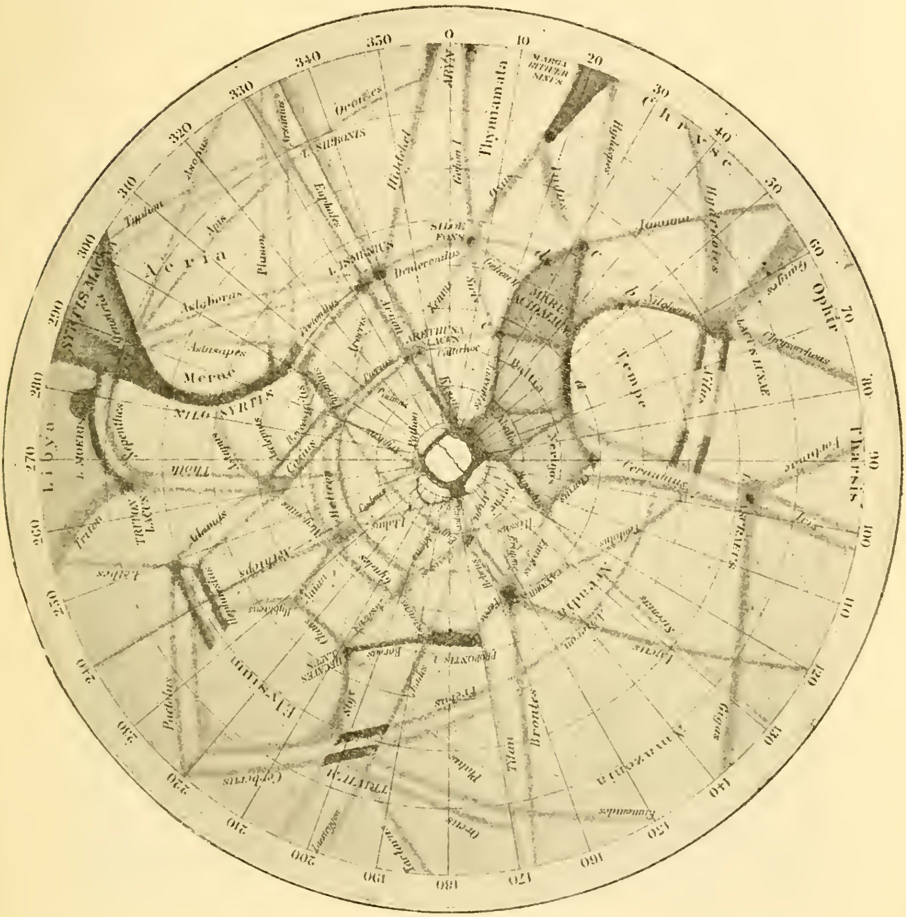
Il en résultait, pour la constitution superficielle de Mars, un mode jusqu'alors absolument inconnu dans le système solaire, et, pour la la planète elle-même, le monde le plus étrange que l'on aurait pu imaginer. On comprend aisément l'émoi que causèrent ces nouvelles lorsqu'elles arrivèrent à la connaissance des différents observatoires.

Autant les premiers travaux de 1877 avaient reçu l'approbation générale et avaient augmenté l'autorité scientifique de l'astronome qui avait su découvrir sur Mars ce que n'avaient même pas soupçonné des observateurs comme Secchi, Kaiser, Dawes, Green et Lockyer,

cependant munis d'objectifs de puissance certainement au moins équivalente, autant les résultats nouveaux parurent sujets à doute à un certain nombre d'astronomes.

Qu'était, en effet, cette génération progressive, continue et, pour

Fig. 32.



Carte de Schiaparelli.

ainsi dire, spontanée sous l'œil de l'observateur, de canaux nouveaux ?

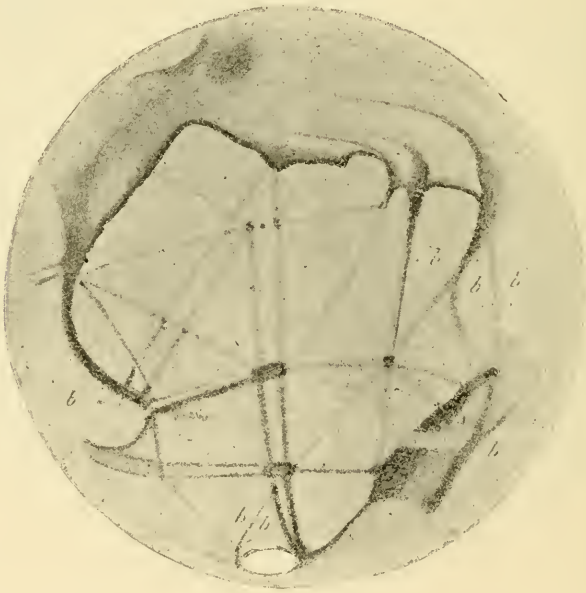
Était-il possible d'attribuer une telle influence constante, soit à la

supériorité éventuelle de l'instrument, soit à la pureté du ciel de Milan, soit à l'acuité de vision de l'observateur?

D'un autre côté, comment s'expliquer ce fait que, dans ses Cartes définitives (*fig.* 32), tous les soi-disant canaux soient, en projection, absolument composés de lignes droites? Quelles sortes diverses de courbes devraient-ils avoir sur le globe de Mars, quelles variétés de courbes inconnues devraient-ils y tracer, pour qu'elles puissent avoir en projection une telle régularité?

Dédoublement des canaux. — Mais l'étonnement fut plus grand encore, lorsqu'après l'opposition de 1882, Schiaparelli annonça que certains des canaux (17) qu'il avait découverts pouvaient se dédoubler et figuraient alors, en projection sur un plan perpendiculaire à la ligne de visée, deux lignes sombres rigoureusement parallèles (*fig.* 33),

Fig. 33.

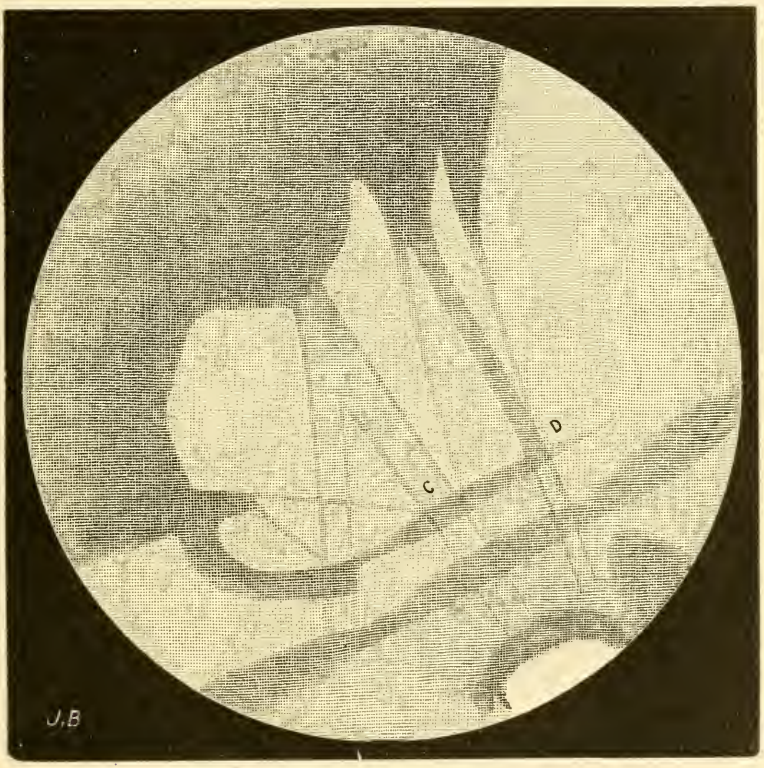


mais souvent d'intensité différente. « Ce dédoublement a lieu dans un temps court et par une transformation rapide; il est le plus distinct dans les portions du disque où le rayon visuel rencontre normalement la surface de Mars et se produit dans certaines saisons. »

Christie, Perrotin, Proctor. — Ces phénomènes curieux sollicitèrent l'attention d'un grand nombre d'astronomes.

Dès 1882, Christie, aujourd'hui directeur de l'Observatoire de Greenwich, et Maunder, son principal assistant, nièrent formellement l'existence d'un pareil dédoublement, tout en confirmant celle de certains des canaux annoncés par Schiaparelli en 1879. Plus tard, à Nice, Perrotin et Thollon conclurent de leurs observations que « plusieurs de ces canaux sont doubles et (*fig.* 34) composés de

Fig. 34.



lignes rigoureusement parallèles ». D'après eux, « leurs observations confirment les belles découvertes de Schiaparelli sur la singulière constitution physique de Mars ».

De son côté, l'astronome anglais Proctor, à qui cependant la

surface de Mars était bien familière, n'admettait point (1888) la réalité des soi-disant canaux annoncés par Schiaparelli.

Les assertions de Christie et de Proctor furent pendant longtemps les seules notes discordantes dans le concert d'approbation formé par les observateurs de Mars; dans la plupart des publications faites sur cette planète, on conclut non seulement à l'existence des canaux, mais aussi à leur dédoublement tantôt fort temporaire, tantôt au contraire durable d'une révolution à l'autre de la planète; ces conclusions furent d'ailleurs confirmées, d'opposition en opposition, aussi bien par Schiaparelli, qui fit dès lors de Mars son étude de prédilection, que par les astronomes américains Lowell, Douglass et W.-H. Pickering, qui furent bientôt les principaux champions de Schiaparelli. Leurs publications sur ce sujet demandent une analyse détaillée.

Lowell, Douglass, W.-H. Pickering. Les mers sont des plaines cultivées. — Les régions, que l'on a appelées *mers,* ne sont pas des étendues d'eau, car la lumière qu'elles réfléchissent n'est pas polarisée; à mesure que s'avance la saison martienne, certaines s'effacent sans que d'autres s'assombrissent; à certaines époques, on voit sur elles des taches sombres ou éclairées. Ce sont là des faits bien établis et que l'on peut considérer comme définitifs : mais alors, que sont ces étendues? Pour Lowell et Pickering, ce sont d'immenses plaines cultivées; et leurs changements reproduiraient les différentes phases de leur végétation.

Les canaux de Schiaparelli sont des vallées cultivées. — Quant aux canaux, d'abord faibles, clairs et indistincts, ils deviennent de plus en plus foncés et mieux visibles à mesure que s'avance la fonte des neiges; leur apparition commence dans les régions polaires et se continue vers l'équateur; ainsi l'eau provenant de la fonte des neiges paraît descendre vers l'équateur et elle semble être la cause originelle de la visibilité des canaux, non par elle-même, car alors ils devraient, par suite de la rapidité d'écoulement de l'eau, se former beaucoup moins lentement, mais par la végétation qu'elle détermine. Ce qu'on a appelé des *canaux* serait des prairies gazonnées ou des vallées boisées; mais le caractère géométrique des lignes qui les forment, leur largeur uniforme et surtout leur rayonnement autour de certains

points spéciaux sont inexplicables par aucun procédé naturel. Ils seraient dus à une action intelligente qui, en raison de la rareté de l'eau sur la planète, l'a recueillie, concentrée et canalisée pour la faire aboutir à des points particuliers, rendez-vous de plusieurs canaux, et que Lowell appelle des *oasis*. Les canaux sont donc des campagnes artificiellement irriguées, d'étendue parfois considérable, puisque certains d'entre eux ont jusqu'à 6000^{km} de longueur et que leur largeur, toujours supérieure à 50^{km}, peut atteindre pour certains 300^{km}; il ne faudrait pas, en outre, croire que le nombre en soit petit : pendant l'opposition de 1894-1895, Lowell et ses collaborateurs en ont pu noter et dessiner jusqu'à 191, et dans leur dernier Mémoire ils en comptent 420 avec 172 oasis.

Oasis. — D'autre part, ces points de rendez-vous existent indépendamment des canaux; la surface jaune et désertique de la planète est, en effet, parsemée d'innombrables petites taches rondes ou ovales, permanentes, et par lesquelles viennent passer les canaux à mesure de leur visibilité ou de leur formation : on n'a jamais vu un seul canal qui ne passe pas par un nombre plus ou moins grand de ces taches, en sorte que quelques-uns d'entre ces canaux « font penser à un collier de perles entourant le globe de la planète ». D'après Lowell, ces taches sont le but de l'existence des canaux; elles constitueraient sans doute les centres d'habitation les plus importants de ce monde éloigné.

Ajoutons qu'en 1894, vers le solstice d'été de l'hémisphère austral, Lowell, à Flagstaff, a vu les *mers* d'une couleur vert bleu brillante, et qu'en 1890 et 1892, à l'équinoxe de printemps du même hémisphère, W.-H. Pickering, à Arequipa, les a trouvées d'un vert brillant « analogue à celui des jeunes feuilles du printemps; mais, à mesure que la saison s'avançait sur la planète, le vert s'était lentement changé en un gris monotone ».

Activité des habitants de Mars. — Pour ces deux observateurs, les mers seraient de grandes étendues couvertes de végétation, les canaux des surfaces de végétation beaucoup plus restreintes se développant de part et d'autre de conduits d'irrigation étroits et invisibles dus au travail des habitants de la planète; les surfaces rougeâtres plus brillantes seraient des déserts auxquels la rareté de l'eau

sur la planète donnerait une étendue beaucoup plus considérable que sur notre globe.

Pour résumer leur pensée. « Mars serait un immense Zuiderzée, où toute l'activité intelligente de ceux qui l'habitent aurait eu pour but primordial et essentiel la création, puis l'entretien et le maintien de ces canaux d'irrigation de longueur énorme et en nombre extraordinaire ».

Venons maintenant au dédoublement de ces canaux. C'est, d'après ces mêmes observateurs, un fait assez rare, puisque, parmi les 191 canaux dessinés par eux dans l'opposition de 1894-1895, ils ne l'ont noté que sur 6 d'entre eux. Ils n'en donnent point d'ailleurs d'explication, parce qu'elle résulte pour eux d'une façon bien nette de la théorie précédente; il suffit, en effet, pour le comprendre, d'admettre que la même activité intelligente qui aurait présidé à la création de ces champs d'irrigation ait ensuite, l'expérience aidant, établi par places un second système d'irrigation voisin du premier et destiné à utiliser le surcroît d'eau provenant parfois d'une fonte plus complète des neiges polaires.

Objections. — Si tout cela pouvait être considéré comme bien établi, nous aurions sur la planète Mars des notions plus précises que celles que nous possédions, il y a moins d'un siècle, sur au moins un quart de notre continent. Examinons donc la question d'un peu près et commençons par les canaux.

Tout d'abord, Lowell n'a détruit aucune des objections que leur existence soulève à première vue et que nous avons indiquées plus haut.

D'un autre côté, les dessins de Mars faits à une même époque par différents observateurs, se servant d'instruments différents, montrent des nombres de canaux parfois fort différents.

Enfin, il résulte des publications de l'Observatoire de Flagstaff que, s'il faut un certain entraînement pour commencer à les pouvoir distinguer, l'œil semble ensuite préparé à en voir de plus en plus; tellement que Douglass affirme en avoir nettement distingué sur le disque de Ganymède, le plus gros des satellites de Jupiter.

En revanche, le célèbre Barnard, armé de la grande lunette ($0^m,91$) du mont Hamilton, déclare n'avoir jamais pu distinguer sur Mars rien qui ressemblât à ce que Schiaparelli a appelé *canal;* mais, ajoute-t-il, « quand les images étaient excellentes, les détails furent si abondants

et si compliqués, principalement dans les régions sombres, qu'il était impossible de les dessiner correctement ».

Quant au dédoublement des canaux, W.-H. Pickering déclare n'avoir jamais rien vu de pareil.

La conclusion de cette analyse est que, dans ce cas comme dans celui de la rotation de Mercure et de Vénus, les particularités objectives sur lesquelles ces nouveautés ont été basées, étant à la limite presque extrême de la visibilité, il aurait fallu, pour en assurer la réalité, les soumettre à des mesures micrométriques et ne pas se contenter de simples dessins. Car, une fois senties d'une façon par un observateur, ces apparences s'imposent ensuite pour ainsi dire à lui, et se continuent de la même façon.

Aussi n'y a-t-il pas lieu d'être surpris de ce que nombre d'astronomes n'ont jamais cru à la réalité de cet aspect nouveau qu'on donnait à la planète Mars; pour eux, l'astronome milanais a certainement aperçu sur le disque de Mars des détails jusqu'alors inconnus et d'ailleurs sans doute imprécis; mais, par un effet assez fréquent dans l'observation des détails à la limite de visibilité, leur aspect réel a été inconsciemment transformé par l'œil, et la notion de canal résultant de cette transformation doit être rangée parmi les *illusions d'optique*.

Expériences de Maunder. — Il manquait, de part et d'autre, l'*experimentum crucis* qui devait trancher la question; et les choses en restaient au même point d'enthousiasme d'un côté et de scepticisme de l'autre. Ce furent Maunder et Evans qui vinrent l'apporter, et cela tout récemment, sous la forme d'une des plus intéressantes leçons de choses qu'on puisse imaginer.

La question, que se pose Maunder, est la suivante :

« L'impression qu'on a devant soi un réseau de lignes fixes, semblable à celui connu sous le nom de *canaux de Mars,* peut-elle se produire, sur des observateurs non prévenus, sans que ces lignes aient une existence objective réelle? et, s'il en est ainsi, quelles sont les conditions les plus favorables à sa naissance? »

Pour y répondre, sa méthode est la suivante :

« Placer en face d'une série de dessins successifs, convenablement choisis et relatifs à Mars, un certain nombre de dessinateurs exercés, et leur donner comme tâche de tracer indépendamment les uns des

autres dans un cercle, de même rayon pour tous et figuré sur le papier, tous les détails que chacun d'eux y verra ou croira y voir. »

Les dessinateurs au nombre de vingt étaient des élèves, âgés de 12 à 14 ans, de l'École de dessin de l'Hôpital Royal de Greenwich, choisis parmi les plus habiles, et dont pas un d'ailleurs n'avait jusqu'alors entendu parler des canaux de Mars.

Afin de varier les conditions de leur vision, on les plaçait successivement à des distances différentes (dans les limites de $4^m,50$ à $18^m,70$) des divers dessins soumis à leur étude, dessins de dimensions également gradués et compris dans des circonférences de diamètres allant de $0^m,08$ à $0^m,16$. Nombreuses sont les expériences faites par MM. Maunder et Evans; je choisis parmi elles celle qui me paraît la plus caractéristique.

Le modèle, soumis aux dessinateurs, était tiré d'un original (*fig.* 35) de Schiaparelli (du 6 mai 1890), où l'on avait supprimé les

Fig. 35.

Dessin de Schiaparelli.

douze canaux que cet astronome y avait indiqués; mais, sur le fond blanc grisâtre du dessin ($0^m,16$ de diamètre), on avait laissé (*fig.* 36) un nombre assez grand de petits points noirs, et tracé, en outre, des lignes fines de forme irrégulière et sinueuses simulant des espèces de rivières. Ce modèle fut utilisé dans deux essais, avec

dix-neuf dessinateurs dans l'un et vingt dans l'autre, occupant des bancs à des distances graduées du modèle ; en combinant les deux essais,

Fig. 36.

Modèle de Maunder.

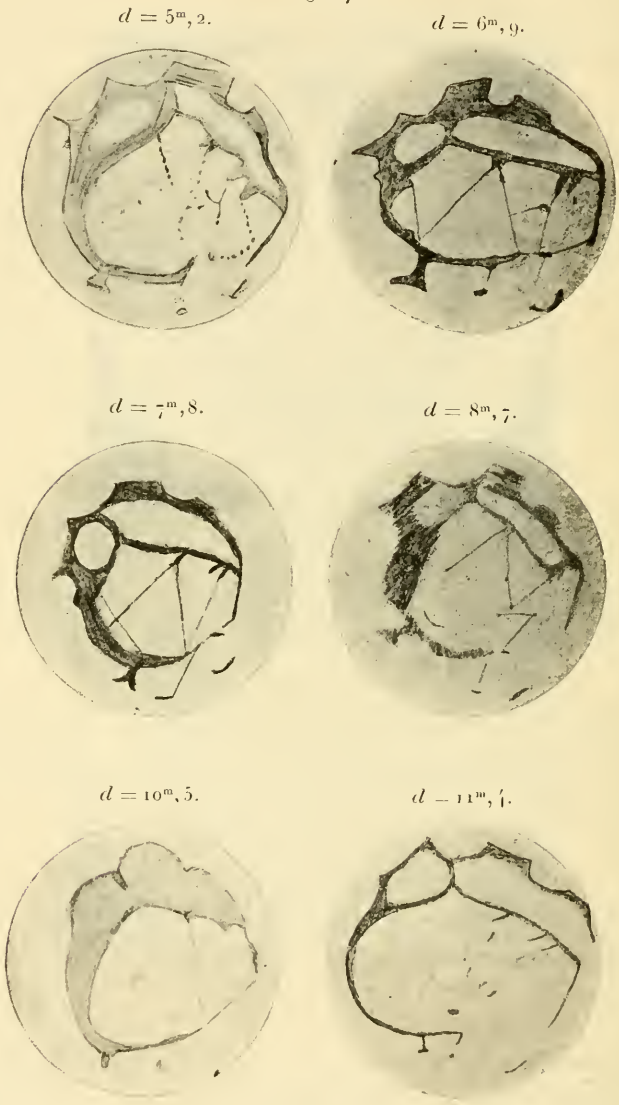
on a les données expérimentales du Tableau suivant, où, par ordre de distance, les bancs sont désignés par les lettres successives de l'alphabet.

Les résultats de ces expériences sont très complets et très instructifs : dans le banc *a* les élèves paraissent être juste aux environs de la distance où les traits fins de l'original commencent à prendre la forme canaliforme ; dans le banc *b* un élève leur donne leur véritable aspect, un autre les voit imparfaitement comme canaux ; les bancs *c* et *d* montrent en tout cas quelques canaux, quelques élèves en voyant plusieurs ; dans le banc *e* les canaux ne sont pas tout à fait aussi bien représentés, quoique chaque élève montrât quelque chose d'eux ; les bancs *f* et *g* ne montrent que fort peu de canaux, tandis que dans le banc *h* la grande majorité n'a vu ni canal ni rien de semblable (*fig.* 37).

Les dessins des élèves des bancs *a* et *b* sont spécialement instructifs en montrant que les détails réels, les sinuosités, les traits en forme de rivière et les différentes taches ont été tout juste visibles pour eux sous leur aspect vrai, ou bien ont commencé à se transformer en bandes semblables à des canaux.

Des douze canaux de la Carte de Schiaparelli, tous ont été plus ou

Fig. 37.



Dessins des élèves.

moins fidèlement représentés; quelques-uns n'ont été tracés que par

un seul observateur, mais les six que porte le Tableau suivant l'ont été très fréquemment :

Numéro du banc..	*a.*	*b.*	*c.*	*d.*	*e.*	*f.*	*g.*	*h.*	Total.
Nombre d'élèves....	2	3	4	3	8	4	4	11	39
Distance au modèle.	$5^m,2$	$5^m,8$	$6^m,9$	$7^m,3$	$7^m,8$	$8^m,7$	$9^m,9$	$10^m,7$	
Diamètre angulaire du modèle.....	105′	94′	80′	75′	63′	55′	52′	48′	

Canal (1).	Nombre de fois que le canal a été marqué par chacun des élèves.								Totaux.
Phison.....	2	2	4	2	5	0	2	2	19
Euphrate.....	2	2	4	3	6	0	4	3	24
Hiddekel.....	2	2	2	2	0	0	2	2	12
Gehon.....	2	1	0	0	1	0	1	2	7
Arnon.....	1	1	4	1	3	2	2	4	18
Deuteronilus.....	1	1	2	0	1	0	2	0	7
Totaux.....	10	9	16	8	16	2	13	13	87
Nombre moyen de canaux par dessinateur.....	5	3	4	2,7	2	0,5	3,2	1,2	2,2

Ceux qui ont été le plus souvent dessinés, Euphrate, Arnon et Phison, correspondent précisément aux lignes fines, mais sinueuses, du modèle, dont la direction moyenne est sensiblement la même que celle du canal qu'ils ont figuré; ces lignes sinueuses, ils les ont non seulement rectifiées mais continuées jusqu'aux parties sombres nettement distinctes qui formaient les limites de leur champ d'expérimentation et qu'à peu près tous ont reproduites avec une égale vérité.

Autres faits à citer, c'est que le nombre moyen par dessinateur de ces canaux fictifs est sensiblement plus élevé aux courtes distances qu'aux autres, que deux des élèves ont marqué sur leurs dessins un canal, le même pour les deux, qui *ne se trouve pas* sur la Carte de Schiaparelli, et enfin que le canal Hiddekel de la même Carte fut marqué comme *double* par deux d'entre eux; la figure 37 reproduit quelques-uns des dessins faits par les élèves.

Dans une autre expérience, on prend le même dessin, mais on change les enfants de rang de façon à mettre aux distances les plus

(1) Les noms des canaux sont ceux de Schiaparelli.

favorables à la vision ceux qui étaient à des places moins avantageuses et qui, par suite, n'avaient point vu de canaux. On constata que les sept élèves qui avaient été ainsi reculés ont, malgré cela, tracé encore des canaux, contrairement à leurs prédécesseurs. Le fait d'avoir eu une première fois cette impression prédispose donc à la retrouver.

Un autre modèle fut un dessin de 15^{cm} de diamètre, basé sur un diagramme de Lowell, sur lequel on avait placé les *oasis* vues par cet astronome et faiblement indiqué trois courts *canaux*. Tous les enfants ajoutèrent des canaux à ceux réellement marqués, et les prolongèrent généralement jusqu'à la partie sombre (mer) la plus voisine.

Dans ce même dessin, au lieu de marquer les *oasis* sans canaux, on a reproduit les canaux sans *oasis*. Les élèves placés à une bonne distance ont tracé les canaux sans hésitation et assez fortement; mais, régulièrement, les *oasis* n'étaient pas indiquées.

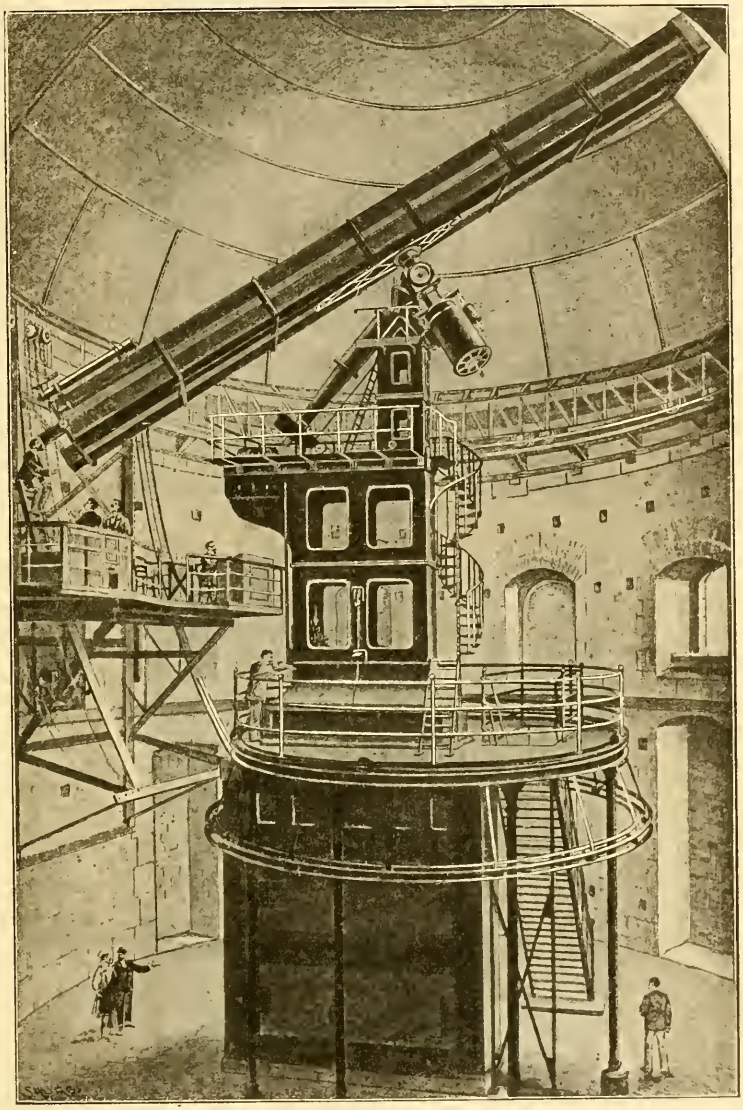
En rassemblant tous ces faits, il semble bien qu'on ne peut échapper à la conclusion que des lignes, ayant tous les caractères des canaux de Mars, peuvent parfaitement être vues, par des observateurs à vue perçante et sans idée préconçue, sur des objets où n'existe aucune marque réelle d'un caractère pareil. Il suffit que les surfaces en question soient parsemées de marques ou inégalités d'éclat à la limite de visibilité et de toutes formes d'ailleurs. L'œil a alors une tendance presque invincible à les réunir par une série de droites. Quant aux *oasis*, au contraire, l'œil ne les crée pas; il n'en voit pas là où elles n'existent point : les *oasis* de Lowell correspondent à ces marques, à ces inégalités d'éclat, qui existent à la surface de la planète; elles ne sont pas le but des canaux, mais bien au contraire la cause même de leur apparente formation.

Observations de M. Millochau. — Voici, en effet, ce que m'écrit à cet égard M. Millochau :

« Alors qu'avec l'équatorial de $0^{m},32$ de l'Observatoire de Juvisy j'apercevais dans les moments de bonne netteté des lignes faiblement teintées, un peu floues, qui semblaient réunir divers points des plages noires toujours visibles sur la planète, avec le grand équatorial ($0^{m},80$) de l'Observatoire de Meudon, je voyais à l'emplacement occupé par

ces lignes (*fig.* 39, 40, 41, 42) des détails isolés, de petites taches

Fig. 38.



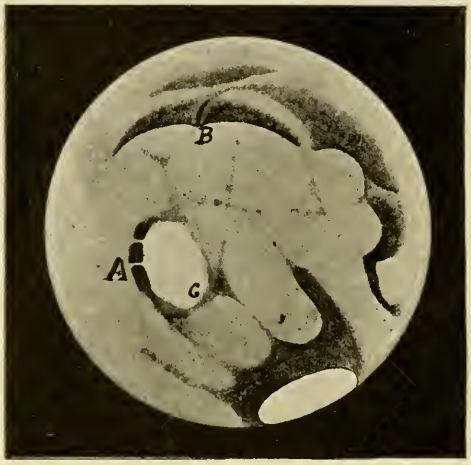
Le grand équatorial de l'Observatoire de Meudon.

sombres, à bords déchiquetés, séparées par des espaces non teintés.

» En résumé, j'ai observé deux sortes de détails sur Mars :

» 1° Les détails qui peuvent être observés d'une manière perma-

Fig. 39.



22 février 1901.

Fig. 40.

11 mars 1903.

nente, à teinte relativement sombre, bien limités; ce sont ceux que l'on a nommés les *mers de Mars*.

» 2° Les détails dont l'observation est plus délicate et nécessite une

Fig. 41.

11 février 1901.

Fig. 42.

14 mai 1903

tranquillité parfaite de l'atmosphère; ces détails sont de petites taches, à bords déchiquetés, irrégulièrement réparties sur le disque.

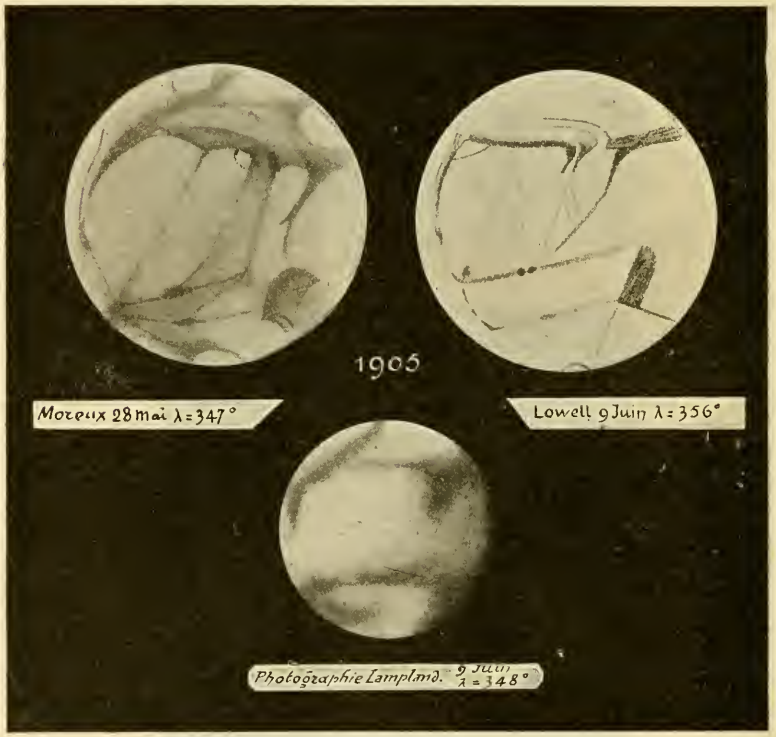
» Ces masses sombres sont groupées de diverses manières, quelquefois alignées suivant un cercle ou une ellipse, quelquefois en ligne

droite (elles forment alors une sorte de chapelet). Le plus souvent, ce sont des plages sombres d'où partent des prolongements diminuant de largeur peu à peu et se fondant dans la partie claire du disque.

Mais, avec un instrument assez puissant, je n'ai aperçu aucun des canaux étroits et rectilignes de Schiaparelli et Lowell. »

Photographies de Lampland. — Ces critiques n'ont pas découragé M. Lowell ni ses collaborateurs. Si leur canalisation de Mars est

Fig. 43.



réelle, on doit pouvoir en obtenir la reproduction photographique; tel est le but qu'ils se sont alors proposé. La question est évidemment très délicate; Mars a de si faibles dimensions apparentes que dans un instrument de $0^{m},50$ d'ouverture son image focale n'a pas plus de 1^{mm} de diamètre, et les inégalités lumineuses de sa surface sont si peu accentuées qu'il faut, pour les faire apparaître photographiquement,

des précautions excessivement minutieuses ainsi qu'une atmosphère d'un calme et d'une sécheresse exceptionnels. Ces deux dernières conditions sont réalisées à l'Observatoire de Flagstaff; quant à la première, M. Lampland paraît être arrivé à obtenir, dans la technique de la Photographie astronomique, des progrès considérables.

M. Lampland commença ses essais en 1903. Mais ce n'est qu'à l'opposition suivante en 1905 qu'il obtint des résultats satisfaisants. La figure 43 en donne une idée; la partie supérieure reproduit deux dessins de Mars, obtenus par l'observation directe, dont l'un de M. Lowell est à très peu près simultané de l'image inférieure. Celle-ci n'est point une photographie directe de Lampland, photographies qui ont au maximum $4^{mm},5$ de diamètre, mais c'est un dessin agrandi fait par M. Moreux après une étude consciencieuse à la loupe de la photographie elle-même. Ce dessin, fait d'après photographie, ne nous montre aucune trace des lignes fines et sombres que donne le dessin de Lowell et qui, d'après ses partisans et lui, forment un réseau à mailles très serrées sur la surface de la planète.

Il convient d'ailleurs d'ajouter que M. Lampland se servait d'un équatorial de $0^{m},61$ d'ouverture (distance focale $9^{m},80$) qu'il diaphragmait à la moitié et même parfois davantage.

Expédition de Todd. — A l'opposition suivante, 1907, M. Lowell organisa une expédition, qu'il confia à M. Todd, chargée d'entreprendre suivant le même plan les mêmes recherches photographiques à Oficina Alianza (latitude = — 21°), au centre du désert de Tarapaca qui constitue un des hauts plateaux des Andes au nord du Chili, où il espérait obtenir, et obtint en effet, des conditions atmosphériques meilleures encore qu'à Flagstaff. L'instrument dont il se servait était un équatorial de $0^{m},46$ de Clark, qu'il diaphragmait comme M. Lampland.

Du 28 juin au 1er août M. Todd obtint environ 7000 photographies de Mars qu'il déclare excellentes; presque toutes, dit-il, montrent les lignes encore si énigmatiques qui ont reçu le nom de *canaux de Mars* ainsi que des oasis; une vingtaine de plaques reproduisent fidèlement, sans aucun doute possible, des canaux doubles ([1]).

([1]) Ce sont par exemple : l'Euphrate, le Nilokeras, le Toth, l'Amenthes, le Géhon, l'Astaboras, le Phison. Je n'ai pas entre les mains de photographies de M. Todd et ne puis par conséquent en donner un spécimen.

Ces photographies ont au maximum $4^{mm},7$ de diamètre et ont été obtenues avec une durée d'exposition variant de 1 seconde et demie à 2 secondes; plusieurs d'entre elles supportent un grossissement de trois à quatre diamètres.

La conclusion de M. Todd est que « les aspects de Mars indiquent une œuvre humaine dans ce réseau géométrique de canaux qui couvre presque entièrement la surface de ce globe, *et dont il n'est plus possible maintenant de douter après cet enregistrement photographique* ».

Objections. Nature de l'image photographique. — Il convient d'être beaucoup moins affirmatif. Il est évident que si les canaux existent réellement on doit arriver à les photographier; mais, de ce qu'on les a obtenus sur la plaque photographique, on n'est pas en droit d'en conclure à la réalité de leur existence sur la planète. C'est ce qu'il est facile de démontrer.

En effet, une plaque photographique est la reproduction de l'image donnée par la lunette dans son plan focal; tout ce qu'elle nous montre existe dans le plan focal ; au point de vue astronomique, c'est l'*image focale* de l'astre qui donne non seulement des détails existant réellement sur celui-ci, mais aussi tout ce qu'y introduisent, en fait d'inégalité lumineuse, les lois de la transmission des ondes à travers l'objectif.

C'est ainsi que M. Angot et moi avons pu photographier le ligament noir des passages de Vénus et de Mercure, qui n'a certainement pas de réalité objective, et qui ne provient que du mode de transmission des rayons lumineux par la lunette ou le miroir servant aux observations.

En réalité, dans le cas actuel, les images photographiques de M. Lowell et ses collaborateurs ajoutent aux détails donnés par les grands instruments de MM. Barnard et Millochau les modifications lumineuses qu'y introduit la diffraction instrumentale dans l'instrument employé.

Celui de M. Lampland avait $0^{m},61$ d'ouverture, celui de M. Todd $0^{m},46$, mais chacun de ces observateurs, afin d'obtenir, disent-ils, « des images plus nettes », les diaphragmaient à moitié et même parfois davantage. En réalité ils employaient donc des instruments d'ouverture au plus égale à $0^{m},30$ et dans lesquels la distance focale était environ

30 fois plus grande que l'ouverture, par conséquent avec lesquels les phénomènes de diffraction instrumentale prenaient une intensité considérable.

Le pouvoir séparateur y était donc certainement inférieur à celui de l'équatorial de $0^m,32$ dont M. Millochau se servait à Juvisy; les petites taches sombres, séparées, obtenues par cet astronome dans son grand instrument, devaient donc former aussi dans le plan focal des instruments de Lampland et Todd, et par conséquent sur la plaque photographique, des lignes continues, faiblement teintées, un peu floues comme dans l'instrument de Juvisy. Ce sont les canaux de Lampland et Todd, qui n'ont point d'existence réelle et sont purement instrumentaux.

Quant aux canaux fins et rectilignes signalés par Schiaparelli, ce sont des illusions d'optique, et elles sont faciles à comprendre.

Les dessins que publient les observateurs ne sont qu'en partie le résultat d'une vision directe et nette. Les inégalités lumineuses les plus marquées frappent les yeux de tous et en forment le cadre commun. Entre les lignes de ce cadre, ils aperçoivent un grand nombre de détails sombres, imprécis, instables, à la limite de la visibilité. Le tracé qu'en fait ensuite chacun d'eux n'est que la synthèse des vues successives qu'il en a au cours de son fatigant examen. C'est le résultat d'une opération de l'esprit qui cherche à combiner entre elles ces différentes apparences, et, dans cette synthèse, ce n'est plus l'œil qui détermine la solution; c'est la plupart du temps l'imagination, et souvent aussi le désir intense de voir ce que d'autres, très renommés, ont annoncé avoir vu.

En ce qui concerne les canaux doubles que M. Todd dit avoir vus sur ses photographies, je n'ai eu entre les mains aucune d'elles et ne puis contrôler son assertion; mais ils me paraissent ne pouvoir être dus qu'à une interprétation inexacte des plaques obtenues.

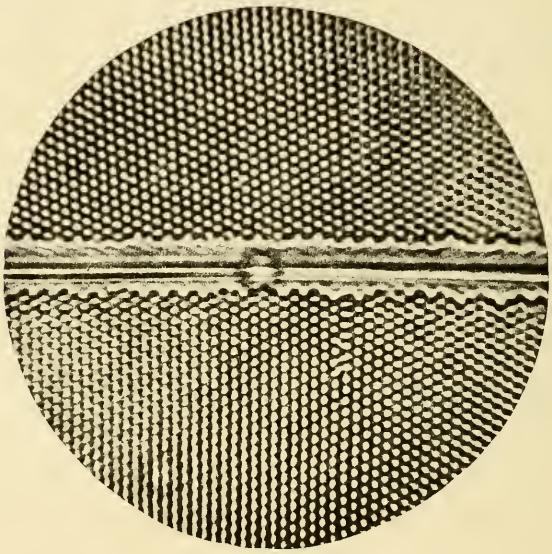
Expériences de M. A. Lumière. — Malgré l'exactitude théorique de ces considérations et l'exemple pratique donné par les photographies relatives aux passages de Vénus, il était bon de soumettre cette question au contrôle direct de l'expérience.

M. Auguste Lumière a bien voulu s'occuper de ce problème. Il l'a résolu en le renversant, c'est-à-dire en s'adressant à une série de taches lumineuses distinctes, ce qui, au point de vue théorique, est

équivalent, et en employant la méthode de photographie microscopique.

L'objet qui lui a servi de modèle est une Diatomée, *Pleurosigma angulatum,* l'un des meilleurs tests pour l'essai des microscopes, et dont les ornements siliceux apparaissent ici comme des cellules hexagonales brillantes formant une série de chapelets parallèles éminemment propre à la production des phénomènes qu'on avait en vue; les figures 44 et 45 donnent les photographies obtenues du même objet avec deux objectifs de pouvoir séparateur différent. L'objectif le plus puissant montre (*fig.* 44) les cellules hexagonales nettement

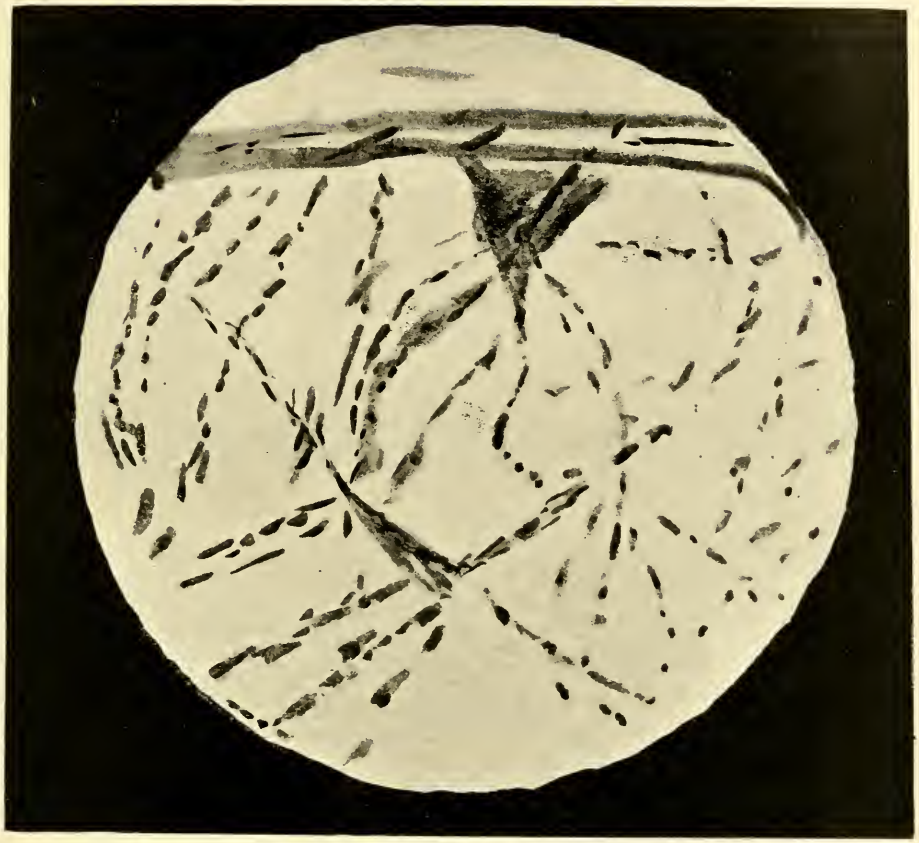
Fig. 44.



séparées; en le remplaçant par un objectif de pouvoir séparateur moindre on obtient la seconde image (*fig.* 45), où ces taches lumineuses forment une série de lignes continues.

J'ajouterai que, au commencement de 1907, M. S. Newcomb pria quelques-uns des astronomes américains, les plus familiers avec la planète Mars, MM. W.-H. Pickering, S. Bailey, E. Barnard et Ph. Fox, de reprendre eux-mêmes les expériences de Maundel.

Ils devaient observer, à 30^m environ de distance, un disque blanc de $0^m,28$ de diamètre, sur lequel Newcomb avait placé, en séries de

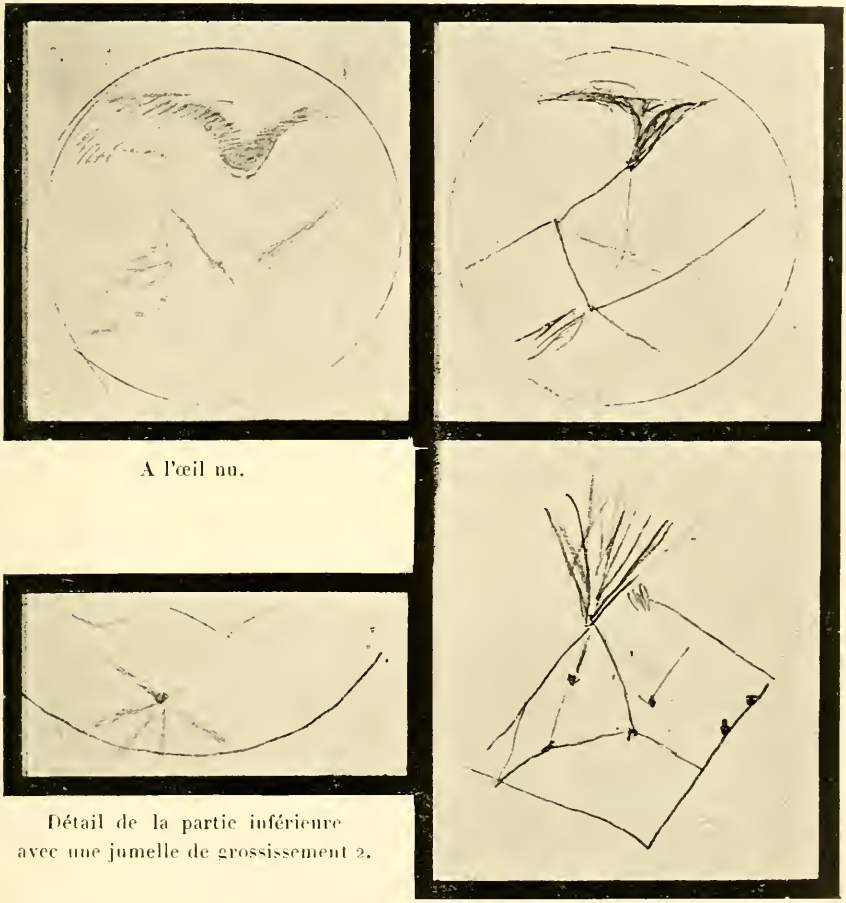


Modèle de Newcomb.

Reduit d'un dessin de $0^m,35$.

Dessins à 30^{m} de distance

de S.-I. Bailey. de W.-H. Pickering.

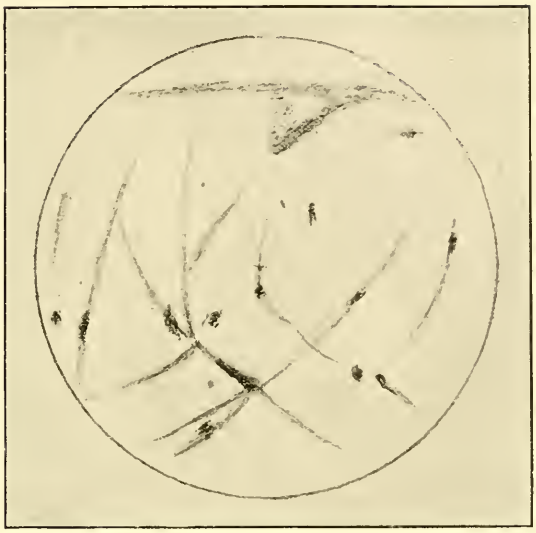


A l'œil nu.

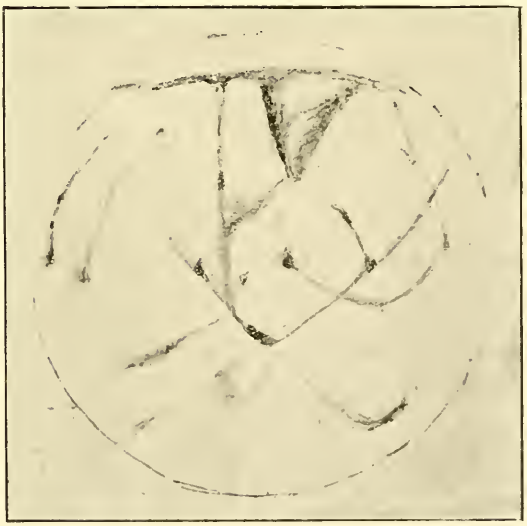
Détail de la partie inférieure avec une jumelle de grossissement 2.

Le dessin supérieur à l'œil nu, le dessin inférieur avec une jumelle de grossissement 2.

Dessins à 30^{m} de distance et à l'œil nu.



E. Bernard.

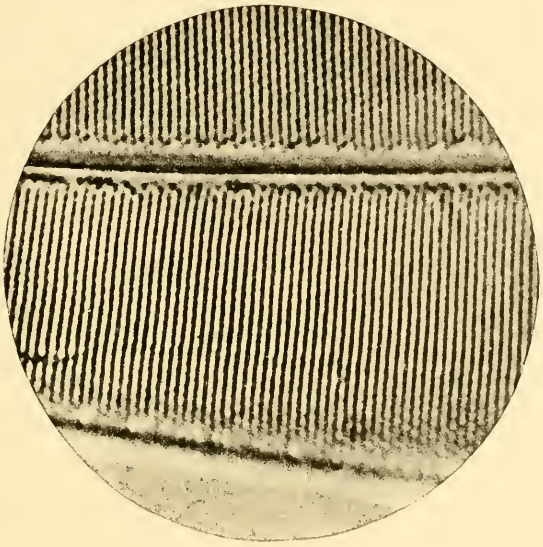


Ph. Fox.

chapelets plus ou moins réguliers, de nombreuses taches obscures distinctes les unes des autres, de façon à obtenir quelque chose d'analogue à l'image de Mars donnée par les grands instruments et traduire ensuite par un dessin leurs impressions visuelles. La planche I donne une réduction du modèle de Newcomb et les planches II et III les dessins tracés par différents observateurs.

Il est à remarquer qu'aucun des astronomes n'a vu de taches séparées, mais tous une série de lignes obscures plus ou moins nombreuses et nettes, et qu'en outre, ce sont Barnard et Fox qui, dans l'observation directe de Mars, n'avaient jamais perçu de canaux, qui ont

Fig. 45.



donné les dessins les plus ressemblants à ceux de M. Lowell.

La canalisation de Schiaparelli et Lowell n'existe pas. — En résumé les canaux, en nombre toujours croissant (ils sont aujourd'hui au nombre de 420 sur les Cartes de M. Lowell) depuis leur annonce par Schiaparelli, signalés par une série d'observateurs à la surface de Mars, n'ont pas plus d'existence objective que ceux tracés sur leurs feuilles de papier par les jeunes dessinateurs de l'Hôpital Royal de Greenwich et les astronomes Barnard et Fox.

Rien donc de ce que, en s'appuyant sur l'existence de cette canalisation, je dirais même volontiers de cette surcanalisation de Mars, on a imaginé pour décrire le mode de vie intellectuelle et physique des habitants supposés de la planète, n'a aucun fondement de réalité. Nous n'en savons aujourd'hui à ce sujet pas beaucoup plus que ce que disait Secchi : « Mars est une planète d'aspect triste et monotone, très peu pourvue d'eau relativement à nous et dont l'atmosphère est beaucoup moins dense que la nôtre. Les conditions de la vie y sont certainement bien différentes de celles au milieu desquelles l'homme poursuit sur la Terre le cours de son existence. »

Température à la surface de Mars. — En terminant cette histoire de la planète Mars, nous croyons devoir ajouter que, comme conclusion d'une longue et savante étude sur les moyens d'évaluer la température à la surface d'une planète, l'astronome américain Lowell indique comme température moyenne à la surface de Mars la valeur 9° C. et comme point d'ébullition de l'eau le chiffre de 44° C.

CHAPITRE III.

PETITES PLANÈTES.

I. — Historique. Notions générales.

Hypothèse de Képler. Propositions du baron de Zach et de Lalande. — A la fin du XVIIIe siècle, la plupart des astronomes étaient convaincus qu'une planète inconnue devait exister entre Mars et Jupiter. Cette affirmation était d'ailleurs ancienne ; elle fut, comme nous l'avons dit plus haut, formulée pour la première fois par Képler. Plus tard (1772), Bode, en énonçant la loi qui porte son nom, avait précisé davantage cette suggestion, puis W. Herschel, en découvrant (1781) Uranus à la distance qu'indiquait la loi de Bode et transformant presque ainsi cette formule empirique en une loi nécessaire, lui donnait un appui considérable. Aussi lors du Congrès de Gotha, en 1796, de Zach, Lalande et Schrœter proposèrent-ils de partager entre un certain nombre d'astronomes l'examen systématique et détaillé de la zone zodiacale qui d'après toute probabilité devait contenir la planète inconnue.

Cérès. Piazzi. Gauss. — Pendant que ces projets s'agitaient, un célèbre astronome italien, Piazzi, directeur de l'Observatoire de Palerme, découvrait dans cette zone, le 1er janvier 1801, une petite étoile de 7e grandeur environ que, renouvelant l'erreur de W. Herschel pour Uranus, il prit d'abord pour une petite comète et qu'il observa assidûment jusqu'au 11 février suivant, époque où une maladie grave le força d'interrompre ses observations. L'état de guerre, qui troublait alors toute l'Europe, retardait beaucoup les communications ; si bien que, lorsque la nouvelle de cette découverte et les renseignements qui l'accompagnaient arrivèrent à Bode, le 5 avril, l'astre était trop près du Soleil pour pouvoir être observé. Cependant la discussion des observations de Palerme lui montra bientôt que cet astre ne pouvait être

une comète, et il pensa que Piazzi avait rencontré la planète soupçonnée par Képler et qu'on s'apprêtait à rechercher. Mais, lorsqu'après son rétablissement, Piazzi voulut la retrouver, son embarras fut très grand, car il avait bien peu de notions sur sa position actuelle. Il n'avait, en effet, pu l'observer que pendant 40 jours, intervalle pendant lequel elle avait à peine parcouru un arc géocentrique de 3°. D'autre part, la loi de Bode donnant sa distance au Soleil et par suite sa durée de révolution, on savait seulement qu'elle sortirait des rayons du Soleil vers la fin de l'année, mais sans pouvoir préciser dans quelles limites de latitude. Avec des données aussi vagues, retrouver la planète était aussi difficile que de la découvrir pour la première fois : elle était donc en grand danger d'être perdue.

Heureusement, il y avait alors à l'Université de Göttingue un jeune privat-docent de 24 ans, déjà bien connu par de beaux travaux d'Arithmétique supérieure, que l'originalité et la difficulté du problème séduisirent. Il était le suivant :

« Avec des observations ne s'étendant pas à plus d'environ un cinquantième (40 jours) de la révolution calculer l'orbite de la planète et prédire la position qu'elle aura plus de 300 jours après la dernière observation. »

Méthode à trouver, procédés de calcul à employer, Gauss inventa tout; et, en moins d'un mois, il publia une éphéméride assez exacte pour que, le 1er janvier 1802, Olbers put retrouver dans le ciel la planète perdue, qu'il nomma *Cérès*. Gauss venait de poser les bases de son célèbre Ouvrage : *Theoria motus corporum cœlestium in sectionibus conicis solem ambientum,* qui parut en 1809 et sert encore aujourd'hui.

Pallas. Olbers. — La lacune signalée par Képler était donc comblée; mais la question se compliqua bientôt. En effet, 3 mois après, le 28 mars 1802, Olbers découvrait dans la même zone un nouvel astre de 8e grandeur environ, dont Gauss calcula bientôt l'orbite et qui fut reconnu circuler comme Cérès entre Mars et Jupiter, sensiblement à la même distance moyenne du Soleil (2,773 au lieu de 2,767), mais dans un plan beaucoup plus incliné sur l'écliptique (34° au lieu de 10°); Olbers le nomma *Pallas*.

Astéroïdes. W. Herschel. — Qu'étaient ces corps? quelles en

étaient les dimensions? W. Herschel chercha de suite à répondre à ces questions; des comparaisons souvent répétées des images télescopiques de Cérès et de Pallas avec des disques lumineux, de diamètres déterminés, placés à des distances connues et vus à l'œil nu, lui donnèrent :

	Diam. ang. à la distance 1.	Diamètre réel.
Cérès.....	0″,35	259^{km}
Pallas.....	0″,24	178^{km}

Ces corps sont donc bien petits comparativement non seulement aux planètes anciennes, mais même à leurs satellites; ce ne sont pas des planètes : aussi W. Herschel les a-t-il appelés des *astéroïdes*. D'ailleurs, en raison même de cette différence spécifique, leur découverte a plus ajouté à l'ornement de notre système que n'aurait pu le faire celle d'une planète comme la Terre ou Mars.

Junon. Vesta. Théorie d'Olbers. — D'un autre côté, puisque chacun d'eux était trop petit pour former une planète, il était naturel de penser qu'ils provenaient de la segmentation d'une planète antérieure. Et, en effet, les calculs de Gauss montraient qu'avec le temps ces deux astéroïdes, Cérès et Pallas, pouvaient se trouver simultanément en des points très voisins l'un de l'autre sur la ligne d'intersection des plans de leurs orbites; telle est la théorie célèbre d'Olbers : *les astéroïdes seraient des fragments d'une planète plus grosse, brisée par une commotion interne.* Sous cette forme précise, cette théorie n'est point exacte; mais elle est vraie dans son sens philosophique. Ces deux astéroïdes ne sont pas les seuls; on doit en admettre un nombre considérable d'autres correspondant à la même période de transformation de la nébuleuse solaire. Quoi qu'il en soit, la théorie d'Olbers eut pour effet pratique immédiat d'exciter à la recherche de ces astres, en la localisant aux régions voisines des deux points d'intersection dont nous avons parlé plus haut; on lui doit la découverte, près de l'un et l'autre de ces points, de Junon (8e grandeur) par Harding, le 1er septembre 1804 et celle de Vesta (6^{gr},7) par Olbers, le 29 mars 1807. Mais les recherches ultérieures d'Olbers, qu'il continua régulièrement jusqu'en 1816, n'aboutirent à aucune découverte nouvelle; et momentanément le nombre des

fragments de la planète primitive hypothétique parut se limiter à ces quatre petits astres.

Cartes de l'Académie de Berlin. Bessel. — Mais bientôt de nouveaux efforts furent faits dans cette voie. Revenant à l'ancienne idée de Lalande et du baron de Zach, l'illustre Bessel proposait en 1824 à l'Académie des Sciences de Berlin de prendre la direction d'une revision complète des étoiles de la zone zodiacale jusqu'à la 9e ou 10e grandeur et d'en publier les résultats en un catalogue et une série de Cartes, afin d'avoir à la fois et la nomenclature et la représentation de toutes les étoiles qui se trouvent dans cette zone jusqu'à cette limite de grandeur. De cette façon, disait-il, « en dirigeant une lunette vers un point quelconque du Ciel, on pourra immédiatement savoir s'il s'y trouve quelque chose de nouveau ».

Ce travail, réparti par heure d'ascension droite entre une vingtaine d'astronomes et commencé en 1826, dura jusqu'en 1859. Il fut l'origine d'un essor décisif dans la découverte des petites planètes (1).

Encke. Astrée. — Le 8 décembre 1845, un amateur passionné de l'Astronomie, Encke, secrétaire des Postes à Driesen (Allemagne), remarqua autour de Vesta, alors en opposition et brillant d'un vif éclat, une étoile de 9e grandeur qu'il n'avait point encore vue à cette place et qui n'était point marquée sur ses Cartes journalières, quoiqu'elles continssent beaucoup d'étoiles de 9e à 10e grandeur et toutes les plus brillantes; elle n'était pas indiquée non plus sur la Carte de l'heure IV de l'Académie de Berlin, correspondante à sa position, quoique le professeur Knorr, qui en était chargé, l'ait faite avec un soin extraordinaire et qu'il y eût marqué toutes les étoiles jusqu'à la 10e grandeur inclusivement.

Encke reconnut bientôt que cette étoile se déplaçait parmi les autres et qu'en conséquence c'était une planète. Dès le 29 décembre, il en calculait l'orbite par la méthode de Gauss : son demi-grand axe était à peu près égal à ceux des planètes précédentes. c'était donc un astéroïde circulant comme eux entre Mars et Jupiter; on le nomma *Astrée*. Mais, son orbite ne passant par aucun des deux points que

(1) *Voir* pour plus de détails sur l'historique de ces cartes : *Traité d'Astronomie stellaire*, par Ch. André, vol. I, p. 61 et suivantes.

nous avons considérés comme communs aux précédents, l'hypothèse d'Olbers n'était plus conforme avec les faits.

Dix-huit mois plus tard (1er juillet 1847), Encke, en construisant la Carte de l'heure XX dont il s'était chargé, trouve une nouvelle planète, Hébé, de 8e à 9e grandeur; en août et octobre de la même année, Hind, à Londres, en trouve deux autres, Iris et Flore; et, à partir de là, les découvertes se succèdent avec rapidité, les Cartes de l'Académie de Berlin, alors toutes publiées, facilitant singulièrement ce genre de recherches.

Cartes écliptiques de Chacornac. Cartes photographiques de MM. Henry. — Mais, les grandeurs stellaires de ces astres nouveaux étant graduellement plus petites, il devint bientôt évident que les Cartes de Berlin qui s'arrêtaient aux étoiles de 9e à 10e grandeur étaient devenues insuffisantes; et, sous l'impulsion de Le Verrier, Chacornac entreprit à l'Observatoire de Paris la construction de Cartes écliptiques contenant toutes les étoiles des 13 premières grandeurs. Ce travail considérable, interrompu par la maladie de cet astronome, fut continué par MM. C. Wolf, Ch. André et Baillaud, puis bientôt après par MM. Henry (1).

La moisson d'astéroïdes devient alors plus abondante, si bien qu'à la fin de l'année 1891 on atteignait le nombre de 322, dont les plus récentes d'ailleurs ne dépassaient guère la 12e grandeur stellaire.

Recherches photographiques directes. Max Wolf. — C'est alors qu'intervint un procédé nouveau de recherche par lequel le Dr Max Wolf d'Heidelberg inaugurait les recherches directes de ces astres par la Photographie : un appareil à portrait de grand champ porté par un équatorial (*fig.* 46) dont la lunette, entraînée par le mouvement d'horlogerie suivant le mouvement diurne, donnait, sur la plaque photographique, l'image d'une assez grande portion du Ciel; les étoiles s'y marquent par des taches rondes de plus ou moins grand

(1) Lorsque ces astronomes furent amenés à construire les Cartes des régions traversées par la voie lactée, ils furent effrayés par l'immensité du travail et la presque impossibilité de le mener à bien par les procédés jusqu'alors employés; ils songèrent à la Photographie. Les excellents résultats qu'ils obtinrent furent le point de départ de la construction de la Carte photographique du Ciel, qui comprendra toutes les étoiles jusqu'à la 14e grandeur inclusivement.

diamètre suivant leur éclat et la durée de pose, tandis qu'en raison de leur déplacement relatif continu, les astéroïdes y forment des traînées rectilignes de longueur variable par suite des mêmes causes.

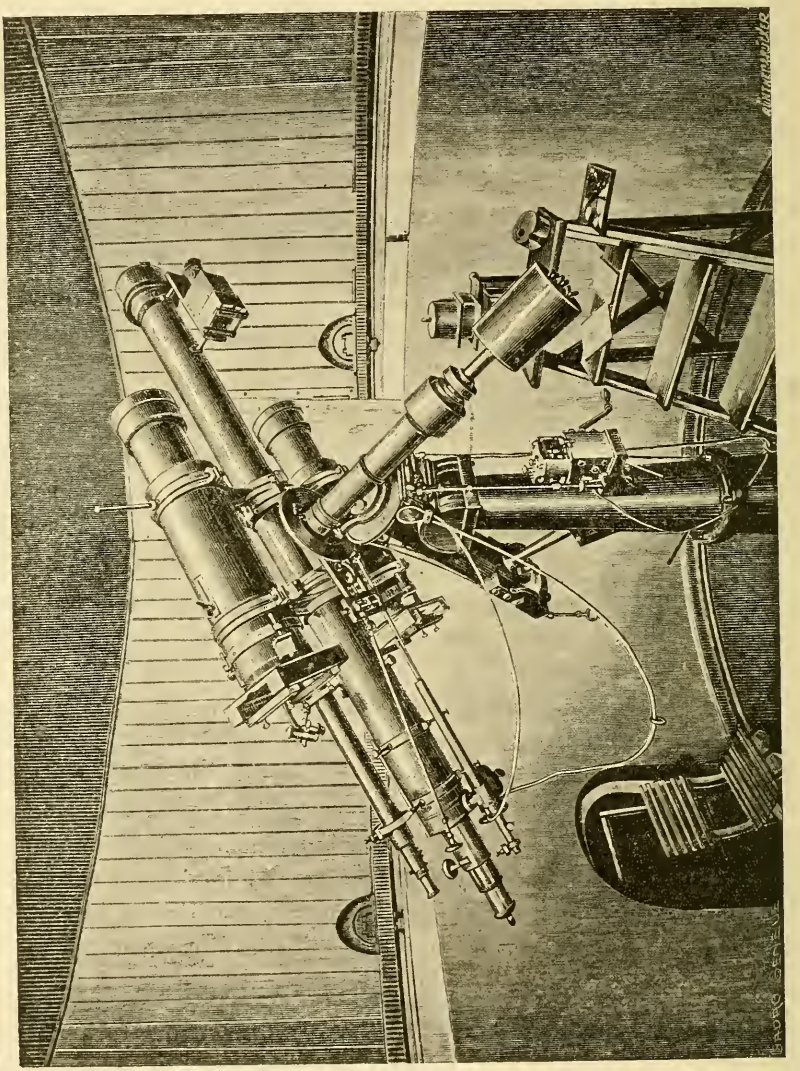


Fig. 46. Installation photographique du Dr Wolf, d'Heidelberg.

Elles se révèlent ainsi elles-mêmes sans qu'on ait eu besoin de faire à l'avance la Carte de cette portion du Ciel. Le premier astéroïde

trouvé de cette façon est Brucia (20 décembre 1891), par Max Wolf; il a le n° 323 dans l'ordre chronologique. Cette méthode, si ingénieuse et si commode, remplaça presque immédiatement l'ancienne. L'astronome Charlois de l'Observatoire de Nice (le *furet français* des astéroïdes, l'adopta dès le mois de septembre 1892): si bien que, sur les 122 astéroïdes nouveaux découverts jusqu'au 31 mars 1899, 6 seulement l'ont été par la méthode directe, qui depuis lors a été définitivement abandonnée.

A la fin de 1901, le nombre total des astéroïdes connus était de 526; on en avait donc trouvé 82 en une période d'un peu plus de deux ans; les découvertes se ralentirent ensuite peu à peu et, à la fin de 1905, leur nombre total était de 603, soit 77 nouveaux en quatre ans.

Emploi du stéréo-comparateur. — A cette date, le Dr M. Wolf inaugura un nouveau procédé de recherche des astéroïdes basé sur l'emploi du stéréo-comparateur et qui consiste essentiellement dans l'examen stéréoscopique de deux photographies d'une même partie du Ciel, données par le même objectif à des instants convenablement séparés.

« C'est un effet bien connu de la vision stéréoscopique que toute différence sur les plaques comparées se remarque aisément : si, par exemple, un objet qui se trouve sur la plaque de droite manque sur celle de gauche, l'observateur reçoit, lorsque son œil passe sur cette région, une impression pénible. L'objet que montre une seule plaque saute loin en dehors du plan de l'image et l'impression reçue est éminemment désagréable. Le même effet se produit, quoique à un degré moindre, s'il n'y a qu'une différence dans la grandeur ou l'éclat d'un même objet. »

Il semble dès lors facile de découvrir les petites planètes sur deux plaques différentes, puisque dans l'intervalle des deux épreuves leurs positions ont changé, et c'est ainsi qu'a été découverte la planète J. F. 1899 par Pulfrich sur deux clichés de Wolf du 9 et 10 juin 1899 (1). Mais, dans la suite, la pratique de ce procédé n'a pas répondu aux espérances de son inventeur, et il paraît être abandonné.

---

(1) Quant au stéréo-comparateur, c'est un grand stéréoscope (*fig.* 47) dont les oculaires seraient remplacés par des microscopes brisés pointant chacun sur l'une des plaques photographiques. Celles-ci sont portées sur un chariot commun, qui peut se déplacer longitudinalement, au moyen de deux cadres séparés qui peuvent avoir

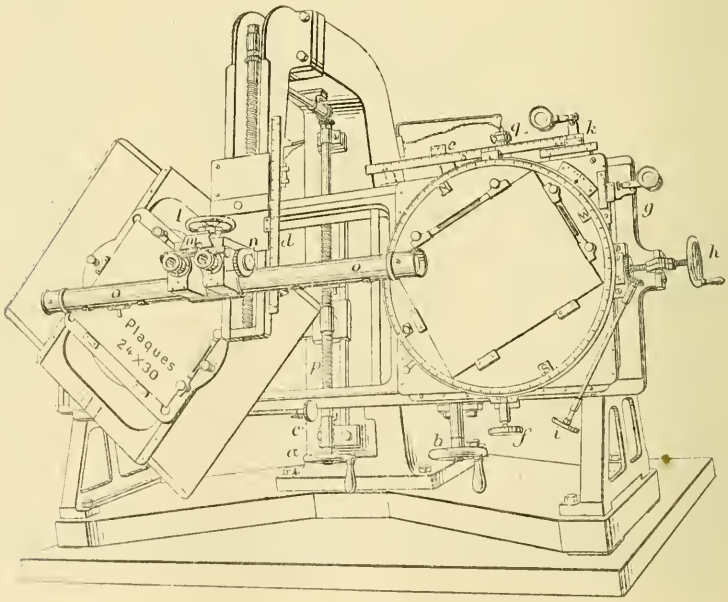
Berliner astronomisches Jahrbuch. — Mais il serait évidemment inutile de donner tant de temps et de soins à la recherche de ces astres, si, une fois trouvés, on les abandonnait pour ainsi dire et si l'on ne s'appliquait point à tracer leur route dans le Ciel, afin de pouvoir toujours les retrouver à volonté et ne point redécouvrir à nouveau un astre ancien. Il fallait donc calculer aussitôt que possible les éléments des orbites de ces astres pour leur constituer ainsi un état civil régulier et definitif qui permette leur observation continue au moment de leurs oppositions et enfin de publier des éphémérides de leurs positions successives.

C'est là une rude tâche, à laquelle, depuis de longues années, se consacre avec le plus grand zèle le Bureau des calculs du *Berliner*

---

indépendamment l'un de l'autre et par rapport au chariot commun à la fois un mouvement de rotation en angle de position et un mouvement de translation parallèle à celui du chariot. On conçoit aisément qu'on puisse par cette disposition amener

Fig. 47.



d'abord chacune des plaques, puis leur ensemble, à la vision stéréoscopique sur la même portion de leur étendue. L'instrument est alors prêt pour la recherche, dont le résultat est pour ainsi dire immédiat.

astronomisches Jahrbuch, sous la direction si éclairée de M. J. Bauschinger.

Conclusion. — La conclusion de ce qui précède est qu'entre Mars et Jupiter nous trouvons, au lieu d'une planète analogue aux autres, un anneau formé de petits corps y circulant dans des orbites diverses. Quels sont ces corps? quelles sont leurs dimensions? et quelle est la constitution de l'anneau qu'ils forment ainsi? Ce sont là des questions du plus haut intérêt au point de vue cosmogonique et qui, depuis quelques années, sollicitent vivement l'attention des astronomes. Pour les résoudre, nous nous servirons surtout des travaux tout récents dus à MM. J. Bauschinger, de Freycinet, J. Mascart et P. Stroobant (1).

Nous remarquerons de suite que, dans les Tableaux statistiques qui vont suivre, la grandeur stellaire d'un astéroïde est sa grandeur apparente lorsque son disque, supposé complètement éclairé par le soleil, est à sa distance moyenne a de l'astre central et par suite à la distance $(1 - a)$ de la Terre; on l'appelle *grandeur moyenne.*

II. — Dimensions des astéroïdes.

Diamètres angulaires et réels des astéroïdes; leurs albedos. — On obtiendrait aisément les dimensions des astéroïdes, exprimées par rapport à nos unités de longueur, si l'on pouvait déterminer leurs diamètres angulaires en un point quelconque de leurs orbites, à l'opposition par exemple, moment évidemment le plus favorable. Malheureusement, ces diamètres sont si faibles que leur mesure en est fort incertaine; et, en fait, nous n'avons de données à peu près utilisables que sur les quatre premiers : Cérès, Junon, Pallas et Vesta; et encore les valeurs obtenues par les différents observateurs ne concordent pas très bien, comme le montre le Tableau suivant :

---

(1) Le travail de M. Bauschinger (1901) se base sur les 458 premiers astéroïdes, celui de M. de Freycinet (1900) sur 428, celui de M. J. Mascart (1904) sur 417 et celui de M. Stroobant (1907) sur 512.

(1) *Cérès.*

1802.	W. Herschel	0",13
1805.	Schrœter	1,26
1839.	Galle	0,32
1866.	Knott	0,51
1901.	Barnard	1,06

(2) *Pallas.*

1805.	Schrœter	1,63
1807.	W. Herschel	0,09
1837.	Lamont	0,26
1901.	Barnard	0,68

(3) *Junon.*

1805.	Schrœter	1",14
1901.	Barnard	0,27

(4) *Vesta.*

1816.	Schrœter	0,32
1847.	Mædler	0,27
1855.	Secchi	0,43
1881.	Tacchini	0,83
1881.	Millosewich	0,60
1901.	Barnard	0,53

En l'absence de moyen réel de discussion de toutes ces valeurs, nous adopterons les plus récentes, obtenues par Barnard, l'un des meilleurs astronomes de notre époque, avec la plus grande lunette du monde, celle de 1^{m} d'ouverture de l'Observatoire Yerkes, à Chicago.

Nous aurons ainsi pour diamètres réels rapportés à nos mesures :

	Grandeur stellaire moyenne.	Diamètres.	Albedo (Mars = 1).
		km	
Cérès	7,1	767	0,67
Pallas	7,7	489	0,88
Junon	9,0	193	1,67
Vesta	6,0	386	2,77

Les albedos (rapportés à celui de Mars), également dus à Barnard et donnés dans la troisième colonne, montrent que ces petits corps n'ont pas la même constitution superficielle. Vesta a une surface fortement réfléchissante, si bien qu'elle est parfois visible à l'œil nu, tandis que celle de Cérès est comparativement sombre.

En résumé, le diamètre moyen des quatre premiers astéroïdes, vraisemblablement les plus grands de tous, est de 460^{km}, le huitième environ de celui de la Lune.

Tels sont les renseignements précis dont nous disposons sur les dimensions de ces astéroïdes.

Mais, à défaut de nombres certains, on peut, en suivant une méthode inaugurée par Argelander et Stampfer, obtenir sur les dimensions moyennes des autres astéroïdes des données qui, tout en

ayant une base en partie hypothétique, ne fournissent pas moins des renseignements intéressants.

Elle est la suivante : les éclats successifs d'un astéroïde varient en raison inverse du produit des carrés de sa distance au Soleil, d'une part, et à la Terre, de l'autre. On peut donc toujours ramener leurs *éclats moyens* à ceux qu'ils seraient si tous ces astres étaient à la même distance de la Terre, par exemple, à l'unité astronomique de longueur, demi-grand axe moyen de l'orbite terrestre. Ces astéroïdes sont alors tous pour nous dans les mêmes conditions de visibilité; leurs éclats particuliers ne dépendent plus que de leurs constitutions superficielles et de leurs dimensions. Dans l'ignorance complète où nous sommes des premières, nous faisons l'hypothèse la plus simple (mais évidemment fausse d'après les albedos ci-dessus) et supposons qu'elle est la même pour tous; leurs éclats relatifs ne dépendront plus alors que des rapports de leurs dimensions : mais, en outre, pour rattacher ce système aux grosses planètes, nous supposerons, avec Bauschinger, que leur albedo commun est la moyenne 0,240 entre celui de Mercure et de Mars; d'un autre côté, la loi physiologique de Fechner [1] relie théoriquement les éclats aux grandeurs stellaires et la valeur empirique donnée par Pogson pour le *rapport de lumière* les relie numériquement.

En dernière analyse, les valeurs g de ces dernières, *réduites* à l'unité de distance, se trouvent, pour tous les astéroïdes, unies par une relation simple avec leurs diamètres relatifs.

Adoptons maintenant, avec Müller de Potsdam, —1,79 pour la grandeur stellaire de Mars à son opposition moyenne, $9'',36$ pour son diamètre apparent à l'unité de distance et $8'',81$ pour la constante de la parallaxe solaire et nous pourrons évaluer, par rapport à nos unités métriques, les diamètres des divers astéroïdes. Ce ne sont évidemment pas leurs diamètres réels, mais seulement des nombres pour ainsi dire de renseignement, qu'en raison de leur mode d'obtention on appelle *diamètres équivalents en lumière*.

Tel est le procédé qu'a employé J. Bauschinger et à l'aide duquel il a calculé isolément le diamètre équivalent de chacun des 458 premiers astéroïdes; il serait trop long de reproduire ici cette liste, cependant fort intéressante. Nous nous contenterons de :

---

(1) CH. ANDRÉ, *Astronomie stellaire*, 1re Partie, p. 110.

1° Mettre en regard les diamètres ainsi trouvés pour les 4 premiers astéroïdes et ceux que Barnard a obtenus directement; on jugera ainsi de l'approximation qu'on peut attendre de cette méthode.

	Diamètre observé.	Diamètre équivalent.
	km	km
Cérès	767	386
Pallas	489	292
Junon	193	146
Vesta	386	417
Moyennes	459	310

2° De donner dans le Tableau suivant les diamètres moyens qu'on déduit de cette liste pour chaque ordre de grandeur, à partir de la 8e, avec leur rapport au diamètre de la Lune.

Grandeur stellaire.	Diamètre moyen en kilomètres.	Rapport au diamètre de la Lune.
8,0–8,9	232	0,067
9,0–9,9	206	0,059
10,0–10,9	142	0,041
11,0–11,9	94	0,027
12,0–12,9	74	0,021
13,0–13,9	44	0,012
14,0–14,9	30	0,008
15,0–15,9	22	0,006
16,0	10	0,008

Le plus fort des diamètres ainsi déterminés, celui de l'astéroïde (10) Hygéa, de grandeur 9,5, est de 346^{km}, et le plus faible d'entre eux, celui de la planète (452), n'a que 10^{km}. Si Cérès, le plus gros de ces astéroïdes, a un diamètre voisin du quart de celui de la Lune, les $\frac{7}{10}$ de ces corps ont des dimensions au plus 20 fois plus petites et le diamètre de quelques-uns d'entre ceux que nous avons pu atteindre jusqu'ici n'en surpasse guère la *trois-centième partie*.

III. — Variations d'éclat des astéroïdes.

Premières indications. — Olbers, Argelander, Ferguson. — Presque aussitôt après sa découverte de Pallas et de Junon, Olbers signale dans sa correspondance avec Gauss ce fait que « leurs inten-

sités lumineuses sont très souvent variables d'un soir à l'autre. » Ces variations d'éclat lui semblent caractéristiques, et, les interprétant dans son hypothèse que ces petits astres sont des fragments d'un autre ayant fait explosion, il exprime « sa conviction qu'ils ne sont pas ronds, mais ont une forme irrégulière, leur intensité lumineuse variant suivant qu'ils nous présentent une face large ou étroite ».

En 1837, Argelander constate aussi dans Pallas des variations atteignant parfois une grandeur stellaire d'un jour au suivant, comme par exemple 9e grandeur le 8 août et 10e grandeur le lendemain 9 août.

Quinze ans après (1851), Ferguson, à la suite d'une série méthodique d'observations d'éclat faites sur une douzaine de ces astéroïdes, arrive à la conclusion que Clio et Astrée seuls présentent des variations faibles, mais certaines, d'intensité lumineuse.

Cause de ces variations. Appel d'Argelander. — Quelle est la cause de ces phénomènes? Le mouvement de révolution de ces corps autour du Soleil étant nécessairement accompagné pour chacun d'eux d'une rotation axiale, c'est à ce dernier mouvement qu'on les attribua d'abord et ce fut la première opinion d'Argelander. Mais plus tard, en 1855, dans un appel qu'il fit aux astronomes pour leur recommander l'étude attentive de ces variations, il dit : « Si telle était leur cause, elles devraient montrer une période régulière et continue; mais il paraît fort vraisemblable que l'espace intraplanétaire de notre système solaire doit être plus ou moins rempli par de petits corps. Si un ou plusieurs essaims d'aérolithes, analogues à ceux que traverse l'orbite de la Terre, traversent aussi celles de Mars ou des petites planètes, la lumière de ces dernières pourrait être momentanément affaiblie d'une façon sensible; mais, à l'inverse des variations, causées par une rotation, celles-ci manqueraient de périodicité. »

L'appel d'Argelander ne fut d'ailleurs pas entendu, faute peut-être de moyens de mesure suffisants.

Frigga. Sa disparition. C.-H.-F. Péters. — Mais bientôt survint un fait des plus curieux. Lorsqu'en 1862 C. H. F. Péters découvrit Frigga (77), cet astre était remarquable par son éclat d'un blanc éblouissant et Péters put le suivre assez longtemps pour que l'orbite qu'il calcula eût une assez grande précision. Malgré cela pendant six

oppositions successives, sauf, peut-être, une observation douteuse en 1862, personne ne la put retrouver, quoiqu'on l'ait cherchée avec le plus grand soin. Péters ne la revit qu'à l'opposition de 1879, parcourant d'ailleurs une orbite très voisine de la première calculée; sa disparition n'est donc point imputable à un défaut de celle-ci. De plus, la planète présenta alors une variation lumineuse régulière, bien nette, atteignant du 24 juillet au 4 octobre une grandeur stellaire et demie, et la longueur de la période ne permet pas de l'attribuer à une rotation axiale. Doit-on en conclure, avec Péters, que Frigga aurait en elle-même une cause propre de variation lumineuse, dont l'éclat s'ajouterait à celui que lui envoie le Soleil, et en tirer, comme MM. Schulhof et Callandreau, un argument en faveur de la communauté d'origine des astéroïdes et des comètes périodiques, qui, elles, sont bien certainemement des sources lumineuses? ou bien, au contraire, doit-on, avec G. Müller, de Potsdam, et sans chercher à expliquer sa disparition pendant 18 ans, admettre que les variations d'éclat de cette planète en 1879 s'expliquent simplement par ce fait qu'elle serait soumise comme Mars à des phases faisant varier régulièrement son éclat au moment de l'opposition?

Variations lentes. Influence de la phase. G. Müller. — L'étude consciencieuse que l'astronome de Potsdam a faite (1886) photométriquement des intensités lumineuses d'un certain nombre d'astéroïdes paraît confirmer cette opinion. Les 17 planètes qu'il a mesurées (1) présentent en effet toutes des variations d'éclat en relation apparente avec leurs phases et telles que leurs grandeurs stellaires varient proportionnellement à l'angle de phase. Le coefficient de proportionnalité varie d'ailleurs suivant l'astéroïde; maximum (0,042) pour Pallas et Cérès, il est minimum (0,018) pour Iris et Harmonia, de sorte qu'à une même distance angulaire de l'opposition la diminution de grandeur est double sur les deux premières (où elle peut atteindre une grandeur entière) que sur les deux dernières. Il semble donc que, quoique ayant probablement une origine commune, tous ces astéroïdes n'ont pas la même constitution superficielle (2).

---

(1) Pallas, Cérès, Métis, Hébé, Lutetia, Irène, Nausikaa, Fides, Eunomia, Daphné, Flora, Vesta, Massalia, Amphitrite, Lœtitia, Iris et Harmonia.

(2) Remarquons que d'après Müller ce coefficient de proportionnalité est 0,037 pour Mercure et 0,015 pour Mars.

Variations rapides. Éros. Egon von Oppolzer. — En outre de ces variations lentes d'éclat, il en a parfois été signalé de très rapides, s'effectuant en quelques heures. Telles sont celles de $0^{gr},6$ en deux heures qu'en 1883 Harrington, de l'Observatoire d'Ann-Arbor, crut avoir constatées sur la planète Vesta. Telles aussi celles qu'en 1899 surtout, Max Wolf d'Heidelberg avait remarquées sur Tercidina (345) et Serona (116), dont les périodes lui paraissaient être d'environ 6 heures et 4 heures. Mais d'une part les mesures trop peu nombreuses du premier laissaient place à certaines critiques, et d'autre part les observations ultérieures de M. Wolf et Hartmann infirmèrent les premiers résultats.

La première démonstration de l'existence de ces variations rapides date du commencement de l'année 1901. Depuis quelques mois, l'astéroïde Éros (433) était l'objet des préoccupations de presque tous les observatoires; c'était sur lui que leurs principaux efforts étaient portés.

Sa grande proximité relative de la Terre l'avait désigné comme devant servir à une détermination de l'unité astronomique de longueur probablement plus précise que celles obtenues jusque-là. Or, peu après le commencement des observations, un certain nombre d'astronomes avaient été frappés par l'instabilité de l'éclat de la planète : parfois, dans le cours d'une même série d'observations, on la sentait s'éteindre graduellement jusqu'à devenir invisible au milieu des étoiles de comparaison; parfois on avait la sensation nette que son éclat relatif augmentait.

Mais, préoccupés par le souci d'assurer avant tout le plus de précision possible à ces mesures délicates et pressés par le court intervalle de leur durée pendant chaque série, ces astronomes ajournèrent jusqu'à la fin des observations, et pour une discussion d'ensemble, l'étude détaillée de ces apparences contradictoires avec les derniers résultats de Wolf et d'Hartmann. Fort heureusement le Dr Egon von Oppolzer [1], qui séjournait alors à l'Observatoire astrophysique de Potsdam afin de s'instruire dans les procédés photométriques de cet établissement, prit pour sujet d'étude la détermination de la grandeur stellaire d'Eros au moment de son opposition. Ses observations,

---

[1] Fils du célèbre astronome viennois et alors assistant à l'Observatoire de Prague.

commencées le 20 décembre, un peu après l'opposition, l'amenèrent bientôt à croire que l'éclat de cette planète était soumis à des variations d'environ une classe de grandeur et assez rapides. Pour décider la question, une série de mesures d'éclat poursuivie d'une façon continue pendant une ou plusieurs soirées était nécessaire : il la commença dans la nuit du 8 février 1901 et le résultat fut de confirmer de la manière la plus probante son opinion première. Cette importante nouvelle, télégraphiée à tous les observatoires, fut bientôt vérifiée par de nombreux observateurs.

L'éclat de la planète était, en effet, très rapidement variable et, *dans un intervalle d'environ 2 heures 30 minutes, cette planète passait de la 11e à la 12e grandeur.*

Au point de vue cosmogonique, la détermination exacte des diverses circonstances de ces variations lumineuses, c'est-à-dire la construction précise de la courbe de lumière qui les représente, prenait une importance considérable; parmi les travaux que cette recherche suscita nous citerons ceux de MM. Rossard et Montangerand de l'Observatoire de Toulouse, Jost d'Heidelberg, Deichmüller de l'Observatoire de Bonn, Wendell d'Harvard College, Guillaume, Lecadet et Luizet de l'Observatoire de Lyon; d'ailleurs, ces dernières observations étant les plus complètes et leurs résultats ayant été confirmés par les autres dans leurs parties communes, c'est à eux que nous bornerons notre analyse.

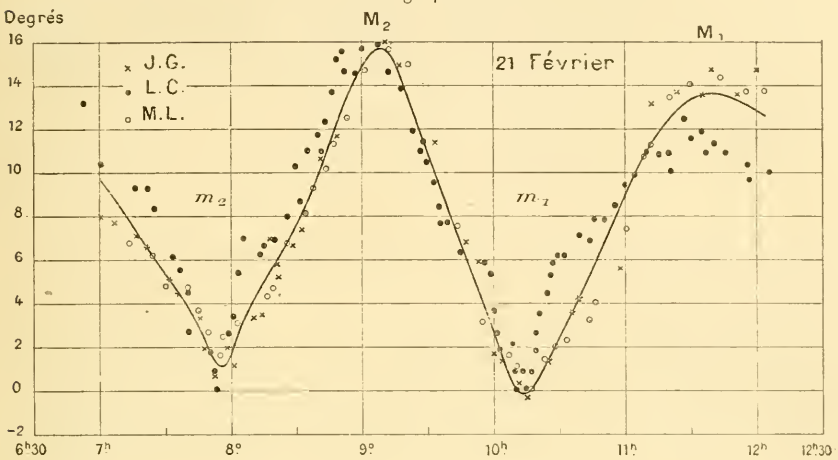
1° La variation lumineuse d'Eros (*fig.* 48) ne peut à l'origine être représentée par une courbe simple; elle forme une courbe à double période, l'une d'une durée de $2^h51^m,4$, l'autre de $2^h24^m,9$, qui diffèrent de $\frac{1}{6}$ de leur valeur moyenne. Mais le 29 mars, après une interruption des observations causée par le mauvais temps, on trouva que la variation lumineuse peut être représentée par une période simple de durée égale à $2^h38^m,1$, précisément égale à la moyenne des deux précédentes.

2° L'amplitude de la variation lumineuse d'Eros, qui à l'origine était de deux grandeurs environ, a diminué progressivement (*fig.* 49) jusqu'à devenir nulle à partir du 20 avril et rester nulle ensuite jusqu'au 24 mai, jour où se sont terminées les observations.

A quoi peuvent être dues ces variations d'éclat apparent qui vont du simple au quintuple? On vit alors les mêmes divergences qui caractérisèrent le problème de la variation d'éclat de l'étoile Algol. Les

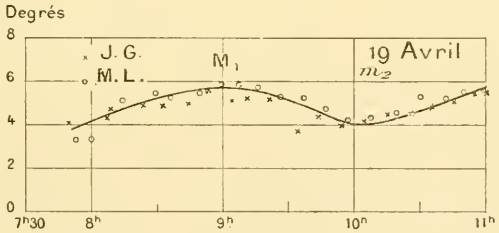
uns, adoptant les idées de Bouillaud (1667), Maupertuis (1734), Olbers (1802) et Zöllner (1865), les attribuèrent à des inégalités de

Fig. 48.



constitution superficielle des différentes portions de l'astéroïde que sa rotation, présenterait à nous avec des éclats différents; d'autres, reprenant le système de Goodricke (1782) en cherchèrent la cause dans l'existence d'un compagnon qui l'éclipserait périodiquement.

Fig. 49.



Il est bien certain que tous les astéroïdes, et par conséquent Eros, tournent sur eux-mêmes pendant leurs révolutions autour du Soleil. Mais il est bien difficile d'admettre, étant donnée l'identité probable de leur mode de formation, qu'un seul d'entre eux présente une telle constitution superficielle, et difficile aussi d'admettre que les différences de pouvoir réfléchissant entre les différentes parties de l'astéroïde soient telles qu'elles fassent varier son éclat apparent dans le

rapport de 1 à 8 suivant la face qu'il nous présente; d'autre part, une telle cause de variation d'éclat donnerait lieu à une courbe de lumière à simple période, et non double comme l'a indiqué l'observation.

L'adjonction d'un compagnon éclipsant est aussi sujette à objection; la variation d'éclat est trop considérable : on démontre, en effet, que dans de pareils systèmes la variation d'éclat ne peut surpasser une grandeur.

Ce problème n'est donc point encore résolu.

III. — Nombre et masse totale des astéroïdes.

Statistique par ordre de découverte (1). — Rangeons, avec M. Bauschinger, ces astéroïdes par ordre de date de découverte, c'est sensiblement celui des numéros par lesquels on les désigne, partageons-les par groupes successifs de 50, et dans chacun d'eux dénombrons ceux qui appartiennent à chaque classe successive de grandeur; nous aurons le Tableau suivant :

	Grandeurs.								
Numéros.	6,1-7,0.	7,1-8,0.	8,1-9,0.	9,1-10,0.	10,1-11,0.	11,1-12,0.	12,1-13,0.	13,1-14,0.	14,1-15,0.
1-50....	1	2	7	17	17	6	1	»	»
51-100....	»	»	»	3	20	22	4	1	»
101-150....	»	»	»	»	17	26	7	»	»
151-200....	»	»	»	2	4	18	22	3	1
201-250....	»	»	»	»	4	19	17	9	1
251-300....	»	»	»	»	2	7	13	23	5
301-350....	»	»	»	2	3	11	21	11	2
351-400....	»	»	»	2	5	12	21	7	3
401-450....	»	»	»	1	3	14	21	10	1
451-500....	»	»	»	»	3	11	13	16	7
Totaux..	1	2	7	27	78	146	140	80	20

Nombre d'astéroïdes par ordre de grandeur stellaire. — L'examen de ce Tableau conduit à quelques conséquences intéressantes :

(1) Cette statistique s'arrête à l'année 1902.

1° Il semble qu'on a découvert toutes les planètes supérieures à la grandeur 10.0 et la plupart de celles de grandeur 10 à 11.

2° L'application de la méthode photographique (à partir de Brucia (323), 22 décembre 1891), a fait tout d'abord augmenter beaucoup le nombre des découvertes d'astéroïdes de 12e à 13e grandeur, mais fort peu celles de 11e à 12e et celles de grandeur inférieure à la 13e.

3° Le nombre des astéroïdes de grandeur 12 à 13 que l'on découvre maintenant va en diminuant; celui des astéroïdes de grandeur inférieure à la 13e va au contraire en augmentant.

Il semble donc que le nombre des astéroïdes de grandeurs égales ou supérieures à la 13e ne puisse s'accroître beaucoup; maintenant égal à 400, il ne pourra guère, au maximum, que doubler. Quant aux astéroïdes plus petits, leur nombre réel est-il considérable? L'observation ultérieure peut seule fournir une réponse précise. Actuellement, nous ne pouvons que lui fixer une limite supérieure, et voici comment nous y arrivons.

Masse totale des astéroïdes. Le Verrier. — Au lieu d'attendre le dénombrement complet de tous les astéroïdes, on peut les prendre en bloc et chercher à peser cet ensemble; on aura certainement ainsi une idée assez nette de l'importance de ce petit monde. Telle est la question que s'est posée Le Verrier et qu'il a résolue en partant des principes suivants : Chacun de ces astéroïdes attire la planète Mars, par exemple, en même temps qu'il en est attiré; et, si minime soit l'action de chacun d'eux, si son effet s'ajoute à celui des autres leur ensemble peut devenir sensible à nos moyens d'observation. C'est ce qui arrive pour leurs actions sur son périhélie; certains termes du développement qui les représente dans la fonction perturbatrice ne dépendant que de leurs distances moyennes au Soleil et des excentricités de leurs orbites, l'ensemble de toutes ces petites masses agit sur le périhélie de Mars à très peu près comme si elles étaient concentrées en une masse unique située à une distance moyenne convenable. Par l'étude des irrégularités du mouvement du périhélie de Mars, on a donc un « moyen de parvenir à la connaissance de la masse totale de ces astéroïdes ou tout au moins d'une limite qu'elle ne saurait dépasser ». Le Verrier a montré ainsi que cette masse ne pouvait

dépasser *le quart de la masse de la terre;* supposons pour préciser qu'elle en soit le *dixième*. Ceci posé, d'après les valeurs des diamètres moyens des astéroïdes de chaque classe de grandeur données plus haut, la masse totale de ceux connus actuellement jusqu'à la 12e grandeur est de six fois celle de Vesta; pour tenir compte des astéroïdes restant à découvrir jusqu'à cette grandeur, supposons-la égale à 10 fois cette dernière, c'est-à-dire (1) les $\frac{2}{1000}$ de celle de la Terre; il resterait pour l'ensemble des astéroïdes inférieurs à la 12e grandeur (découverts ou à découvrir) les $\frac{98}{1000}$ de la masse de la Terre. Donnons-leur à tous en moyenne une masse égale à celle d'un astéroïde de 12e grandeur, soit 0,002 de celle de Vesta; nous verrons aisément qu'il faudrait environ deux millions de ces astéroïdes pour atteindre la valeur cherchée.

S'il en était ainsi, l'anneau formé par les astéroïdes circulant entre Mars et Jupiter, serait composé *d'un petit nombre de corps relativement assez gros, noyés au milieu d'une véritable poussière d'astres*. C'est d'ailleurs la conception à laquelle Le Verrier avait été amené dans ses belles recherches sur ce sujet.

IV. — Constitution de l'anneau des astéroïdes.

Dimensions de l'anneau des astéroïdes. — Quelles sont les dimensions de cet anneau ? Telle est la première question à résoudre : le Tableau des orbites actuellement déterminées montre que la plus faible distance moyenne au Soleil est 1,94 pour l'astéroïde Hungaria de 12e grandeur (434) et la plus grande est 4,26 pour Thulé (279) de 14e grandeur; à la première correspond une durée de révolution de 3ans,02 et à la seconde une durée de révolution de 8ans,80 (2).

Ces astéroïdes s'étendent donc bien au delà, surtout du côté extérieur, de la distance qu'assignait la loi de Bode; d'autre part, la lar-

(1) Je suppose à Vesta la même densité moyenne que la Terre.

(2) Nous avons mis à part l'astéroïde Eros, dont la distance moyenne au Soleil, 1,46, est inférieure à celle de Mars. 1,52, et qui, par conséquent, ne rentre pas dans la définition générale : l'excentricité de son orbite est 0,21 et son inclinaison 9° 57′. En raison de cette excentricité elle est à l'aphélie plus éloignée du Soleil que Mars (1,79 au lieu de 1,52); sa plus petite distance au Soleil est 1,27.

geur de leur anneau (2,32) est une fois et demie la distance de Mars au Soleil, soit *trois cent vingt-quatre millions de kilomètres*.

Que sont auprès de cette immensité les diamètres de ces astéroïdes? Le plus gros, Cérès, n'en occupe pas la trois-cent-millième partie et le diamètre des plus petits ne serait sans doute pas le tiers de sa dix-millionième partie : la limite intérieure de cet anneau est une fois et demie plus distante de Mars que Mercure du Soleil, et sa limite extérieure est aussi éloignée de Jupiter que la Terre du Soleil.

Distribution des astéroïdes. — Comment sont distribués ces astéroïdes à l'intérieur de cet immense anneau? Nous pouvons étudier leur distribution de deux façons différentes : à un point de vue d'ensemble ou dans le détail.

a. Distribution d'ensemble. — Avec M. Stroobant rangeons-les en une longue série, suivant l'ordre croissant de leurs distances au Soleil; partageons-la par groupes correspondant à des anneaux de 0,3 de largeur (l'unité de longueur est la moyenne distance de la Terre au Soleil) et comptons le nombre des astéroïdes que renferme chacun de ces anneaux successifs. Nous aurons les nombres n du Tableau suivant (M. Stroobant base sa statistique sur les 503 premiers astéroïdes) :

Limites des anneaux.	Rayon moyen a.	Nombre d'astéroïdes. n.	N.	N'.
1,65–1,95.....	1,8	1	»	1
1,95–2,25.....	2,1	23	23	20
2,25–2,55.....	2,4	97	104	78
2,55–2,85.....	2,7	199	238	159
2,85–3,15.....	3,0	136	188	113
3,15–3,45.....	3,3	46	76	42
3,45–3,75.....	3,6	3	6	3
3,75–4,05.....	3,9	5	»	»

Les nombres n montrent un maximum très net et très marqué vers la distance 2,8, distance qu'indiquerait la loi de Bode pour la position de la planète hypothétique de Képler, et aussi une décroissance à peu près symétrique de part et d'autre de ce maximum, sauf une exception peu importante, vers la grande distance 3,9, indiquant une

tendance des astéroïdes à se porter plutôt vers Jupiter que vers Mars et que nous négligerons pour l'instant.

La courbe que l'on construit avec eux et qui a une grande analogie avec l'exponentielle qui représente la loi de probabilité des erreurs accidentelles, nous donnerait la loi générale de distribution des astéroïdes, suivant leur distance au Soleil, si nous étions certains d'avoir fait entrer en compte dans notre dénombrement tous les astéroïdes qui existent réellement dans les anneaux successifs. Or, il n'en est certainement pas ainsi.

En effet, l'éclat apparent d'un de ces astéroïdes diminuant en raison inverse du produit des carrés de ses distances au Soleil et à la Terre, sa grandeur stellaire diminue progressivement lorsqu'on le transporte du bord intérieur au bord extérieur de l'anneau et les diminutions du bord intérieur au bord extérieur de chacune des zones élémentaires précédentes sont les suivantes :

Limites.	Diminution de grandeur.
1,65-1,95	1,18
1,95-2,25	0,91
2,25-2,55	0,74
2,55-2,85	0,63
2,85-3,15	0,54
3,15-3,45	0,48
3,45-3,75	0,43
3,75-4,05	0,39
Total	5,30

Ainsi, un astéroïde de 10e grandeur appartenant au bord intérieur de l'anneau serait, par le seul fait de son transport au bord extérieur, devenu un astéroïde de $15^{gr},3$ et, par suite, invisible dans la plupart des plus puissants instruments, quoique existant réellement.

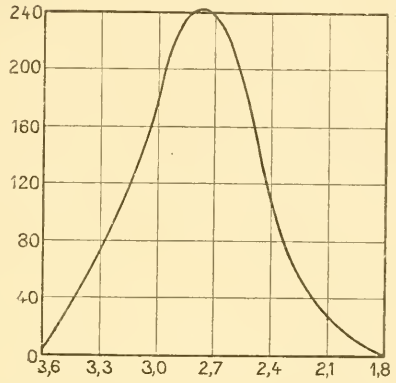
Il y a évidemment lieu de tenir compte de cette cause de disparition : M. Stroobant le fait par un calcul à la fois simple et ingénieux et obtient les nombres N du Tableau précédent.

De plus, en divisant ces nombres N par les rayons moyens de chaque zone, il a dénombré les astéroïdes par couronnes circulaires de même surface, obtenant ainsi les nombres N′ du même Tableau.

Ces résultats N et N′, qui peuvent être regardés comme la véritable expression de la loi de distribution des astéroïdes dans l'espace, sont représentés par les courbes des figures 50 et 51. Ce sont encore des

exponentielles et leur aspect montre, de la façon la plus nette, que dans ce système de corpuscules de dimensions et de distances diverses

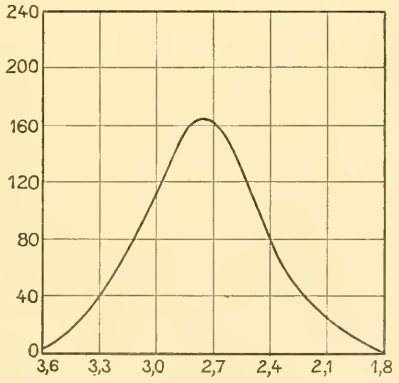
Fig. 50.



le plus grand nombre et, en outre, comme nous allons le voir, les plus gros sont réunis vers la distance 2,8 qu'assignait la loi de Bode à la planète hypothétique de Képler.

Divisons, en effet, l'anneau des astéroïdes en trois zones corres-

Fig. 51.



pondant aux distances 2,0-2,5, 2,5-3,0, 3,0-3,5; dénombrons d'une part le nombre ν d'astéroïdes contenus dans chaque zone et, d'autre part, celui des astéroïdes de grandeur inférieure à $12^{gr},9$, astéroïdes

que nous pouvons considérer comme *faibles;* nous aurons les résultats suivants :

Zones.	ν.	f.	$\frac{f}{\nu}$.
2,0–2,5	114	30	0,263
2,5–3,0	261	48	0,184
3,0–3,5	128	27	0,211

La proportion des astéroïdes faibles, par rapport au nombre total d'astéroïdes contenus dans chaque zone, est, on le voit, sensiblement plus petite dans la zone centrale, qui est en même temps la plus riche.

C'est là un fait général, déjà signalé par J. Mascart, dès 1897, *les astéroïdes faibles sont relativement moins nombreux dans les zones les plus riches.*

On peut voir une autre indication de cette loi dans la répartition des astéroïdes principaux; aucun ne se trouve dans les régions pauvres; on les trouve, au contraire, dans les parties les plus denses de l'anneau. Voici, en effet, la liste des petites planètes dont le volume est supérieur à 0,02 de celui de Vesta et, par suite, relativement les plus grosses.

Astéroïde.	Volume.	Distance moyenne.	Astéroïde.	Volume.	Distance moyenne
(4)	1,000 00	2,561	(471)	0,022 70	2,877
(7)	0,026 29	2,386	(22)	0,026 06	2,911
(9)	0,026 29	2,387	(16)	0,037 03	2,921
(29)	0,040 33	2,554	(349)	0,029 92	2,925
(15)	0,044 71	2,644	(52)	0,022 70	3,094
(3)	0,042 92	2,688	(10)	0,068 55	3,135
(1)	7,950 00	2,768	(511)	0,068 55	3,162
(2)	1,958 00	2,770			

En comparant les distances moyennes de ces astéroïdes aux nombres du Tableau de la figure 52, on constate qu'ils se trouvent tous dans des zones relativement riches.

b. Étude de détail. — Au lieu d'une vue d'ensemble de cet anneau, nous pouvons l'étudier, pour ainsi dire, pas à pas et en détail. Dans ce but, substituons avec Bauschinger à l'ordre croissant des distances l'ordre décroissant de leurs moyens mouvements; nous partagerons cette série en groupes successifs déterminés par des différences de 10″

dans les moyens mouvements 600″ à 610″, 610″ à 620″, etc.; et nous compterons le nombre d'astéroïdes contenus dans chacun d'eux : nous formerons ainsi le Tableau suivant où μ désigne le moyen mouvement et N le nombre d'astéroïdes compris entre ses valeurs indiquées :

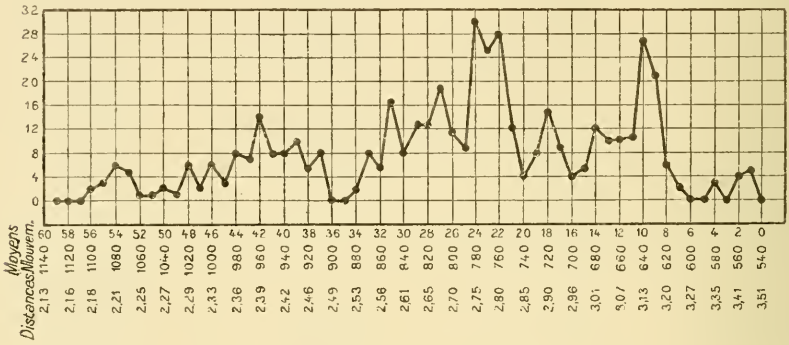
μ.	N.	μ.	N.	μ.	N.	μ.	N.
1300″–1310″	1	1010″–1020″	2	840″–850″	8	670″–680″	10
1190–1300	0	1000–1010	6	830–840	13	660–670	10
1180–1190	1	990–1000	3	820–830	13	650–660	11
1170–1180	1	980– 990	8	810–820	19	640–650	27
1140–1170	0	970– 980	7	800–810	11	630–640	21
1130–1140	1	960– 970	14	790–800	9	620–630	9
1120–1130	0	950– 960	8	780–790	30	610–620	2
1110–1120	0	940– 950	8	770–780	25	600–610	0
1100–1110	2	930– 940	10	760–770	27	590–600	1
1090–1100	3	920– 930	5	750–760	12	580–590	3
1080–1090	6	910– 920	7	740–750	4	570–580	1
1070–1080	5	900– 910	0	730–740	9	560–570	4
1060–1070	1	890– 900	0	720–730	15	550–560	5
1050–1060	1	880– 890	2	710–720	9	540–550	4
1040–1050	2	870– 880	8	700–710	4	460–540	0
1030–1040	1	860– 870	5	690–700	7	450–460	5
1020–1030	6	850– 860	17	680–690	13	420–430	1
						400–410	1

Si l'on se borne aux traits principaux, voici comment est constitué l'anneau : nous partons de sa limite extérieure.

Bien loin on trouve d'abord deux astéroïdes isolés, vers la distance 4,26 du Soleil (403″ et 423″), puis un vide s'étendant de 3,92 (459″) à 3,45 (540″) et une petite accumulation vers 550″ qui commence réellement la partie importante de l'anneau. Une lacune considérable lui succède, qui s'étend de 3,30 à 3,22 (vers 600″), suivie d'une forte accumulation vers 3,13 (640″), et bientôt de 2,53 à 2,48 (vers 750″) un nouveau vide suivi de 2,80 à 2,70 (vers 780″) d'une nouvelle accumulation un peu plus forte que la précédente et qui comprend Cérès, Pallas et Junon; puis après quelques oscillations un vide important de 2,51 à 2,48 (vers 900″). Vient alors une accumulation secondaire à 2,39 (vers 950″) où se trouve Vesta, un nouveau vide de 2,27 à 2,25 (vers 1050″) et une petite accumulation vers 2,20 (vers 1080″) qu'on peut considérer comme la limite intérieure de l'anneau, car après elle on ne trouve plus que deux astéroïdes vers 2,12 et enfin le dernier, Hungaria (434), à 1,95 (1309″).

Représentation géométrique. — Pour interpréter ces faits, nous représenterons (*fig.* 52) les données précédentes par une courbe, dont les abscisses seront les moyens mouvements de chaque groupe, et les ordonnées le nombre d'astéroïdes qu'il contient : nous la limiterons d'ailleurs à sa partie utile, 1120″ à l'intérieur et 540″ à l'extérieur; nous ferons ensuite tourner cette courbe autour de l'axe vertical : elle déterminera ainsi, avec l'axe horizontal, un solide dont la

Fig. 52.



surface supérieure sera l'image de la constitution de l'ensemble des astéroïdes. Ces corpuscules y seront évidemment groupés par anneaux successifs correspondant aux renflements, séparés par des vides parfois absolus représentés par les vallées.

C'est en petit l'image de l'anneau de Saturne, avec ses divisions. Dans le cas actuel, il y a trois anneaux principaux limités chacun d'un côté par un vide réel; mais, même de ces côtés, l'anneau n'est pas absolument tranché et les bords n'en sont pas aussi nettement délimités que le paraissent ceux des divisions de Saturne [1].

Quant aux largeurs des vides qui séparent ces anneaux secondaires, elles sont, à nos mesures, considérables. Le premier s'étend, en effet, sur une largeur de 7 412 000^{km} et l'autre sur 8 895 000^{km}, soit 1160 et 1390 fois le rayon de la Terre ou enfin en moyenne, 10000 fois le rayon de Cérès, le plus grand de ces astéroïdes, et

---

[1] Bauschinger appelle *groupe martien* l'ensemble des astéroïdes alors au nombre de 108 de 1020″ à 900″, *groupe principal* les 337 astéroïdes de 900″ à 600″ et *groupe jovien* les 18 astéroïdes de 600″ à 400″.

360 000 fois le rayon moyen de ceux qui sont supérieurs à la 12e grandeur (1).

Telle est la constitution de cet anneau, constitution bien faite pour surprendre. Quelle peut être l'origine d'une pareille formation? C'est la question qui se pose maintenant.

V. — Mode de formation de cet anneau.

Distribution singulière des lacunes. Loi de Kirkwood. — Le voisinage de la grande masse de Jupiter a porté quelques astronomes à lui attribuer cette fonction et une relation importante signalée pour la première fois par Kirkwood en 1860 viendrait à l'appui de cette idée. Les vides ou, pour être plus général, les *lacunes* que nous avons signalées plus haut dans la distribution des astéroïdes ne sont pas les *seules;* il en existe beaucoup d'autres plus ou moins fortes, plus ou moins étendues; or, si l'on imagine un *astéroïde fictif occupant le milieu de chacune d'elles, sa durée de révolution serait toujours une fraction simple de celle de Jupiter.* Ainsi, pour les deux grandes lacunes (planètes des types Hécube et Hestia), les durées de révolution seraient la moitié et le tiers de celle de Jupiter.

Les astronomes énoncent cette relation d'une façon un peu différente. *Il y a entre les moyens mouvements de ces astéroïdes fictifs et celui de Jupiter un rapport de commensurabilité simple;* ce rapport est 2 ou 3 pour les lacunes précédentes, pour les autres il est $\frac{5}{3}$, $\frac{7}{3}$, $\frac{5}{2}$, $\frac{7}{2}$, .. (2).

---

(1) Je crois devoir reproduire ici ce que dit à ce sujet J. Mascart, dans *La question des petites planètes :*

« Mais, de ce que les planètes rangées suivant leurs moyens mouvements se divisent en un certain nombre de groupes bien tranchés, il ne s'ensuit nullement que leur anneau autour du Soleil comporte les mêmes divisions et se résolve en un nombre correspondant d'anneaux concentriques. Et, en effet, à l'origine de ces recherches, on ne considère que quelques éléments dégagés de leurs liaisons avec les autres, ce qui ne saurait être regardé comme satisfaisant.

» D'Arrest et Jahn montrent l'enchevêtrement de toutes les orbites comme des maillons entrelacées d'une chaîne sans bout; et, si les orbes étaient matériels, on pourrait entraîner tous les autres en tirant l'un d'eux ».

(2) Nous ferons remarquer à ce sujet que trois astéroïdes, (67), (142), (182), ont un moyen mouvement à peu près moitié de celui de Mars et quatre, (116), (176), (199), (316), un moyen mouvement trois fois moindre que celui de cette planète

Les lacunes préexistent à l'action de Jupiter. — Cette relation mathématique paraît lier l'existence de ces lacunes à une action attractive de Jupiter; mais, pour être en droit d'affirmer que l'une est la cause de l'autre, il faudrait pouvoir démontrer « que deux planètes dont les durées de révolution sont dans un rapport commensurable simple se trouvent par cela même dans un état d'équilibre instable, qu'elles doivent tendre à abandonner immédiatement [1] »; ou, comme le dit J. Mascart « que les astéroïdes se trouvent alors dans une région qu'ils doivent s'efforcer d'abandonner sous l'influence progressive des perturbations ».

Malheureusement, il arrive que, dans ces conditions, la théorie ordinaire des perturbations est en défaut, les termes qui s'y rapportent dans les formules, et qui croissent alors au delà de toutes limites, n'ayant plus une signification réelle. Malgré les travaux très nombreux qui ont été entrepris pour vaincre cette difficulté, qu'on retrouve d'ailleurs aussi dans les mouvements des satellites de Jupiter et de Saturne, la question n'est point encore résolue.

Certainement aux distances correspondant aux lacunes l'effet perturbateur de Jupiter est plus considérable qu'en deçà et qu'au delà puisqu'en raison même de cette commensurabilité le Soleil, Jupiter et l'astéroïde reprennent périodiquement la même situation relative et que les perturbations correspondant à cette position doivent s'accumuler pendant longtemps au lieu de se compenser au bout d'un temps assez court comme il arrive dans le cas général. Mais, ainsi que le fait remarquer Newcomb, cette accumulation ne croît pas au delà de toute limite de manière à compromettre la stabilité du système, et il n'y a probablement que des oscillations plus ou moins irrégulières, de telle sorte que l'équilibre se rétablit incessamment.

Il semble donc résulter de l'ensemble de ces travaux que, très vraisemblablement, si les lacunes n'avaient point existé dès l'origine, les perturbations seules de Jupiter n'auraient pas suffi à les produire et que, par suite, elles existaient sans doute déjà immédiatement après la formation des astéroïdes.

D'ailleurs, à défaut de solution générale du problème de l'anneau et des lacunes, l'étude spéciale de certains cas particuliers peut nous

---

[1] Tisserand. *La question des petites planètes* (*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour 1891, B, p. 13).

donner quelques renseignements utiles. Tel est celui de la planète Hécube (108) dont le moyen mouvement 617″ est très voisin du double de celui de Jupiter 300″. Depuis sa découverte par Luther à Dusseldorf en 1869, Schulhof a pu, en tenant compte de chaque nouvelle opposition, en calculer de nombreuses orbites et la comparaison de ces orbites successives montre une variation sensible du moyen mouvement, une diminution constante et notable de la longitude du périhélie et une augmentation continue de l'excentricité : changements qui mettent en évidence l'action perturbatrice de Jupiter et donnent la mesure de son influence sur la constitution de l'anneau au voisinage de cette lacune importante.

D'un autre côté, les travaux théoriques très nombreux que l'étude de cette planète a suscités, aboutissent à cette conclusion que « dans certains cas, les moyens mouvements de Jupiter et d'un astéroïde peuvent être exactement commensurables à un moment donné sans qu'il en résulte aucune instabilité; les oscillations sont régulières de part et d'autre, et la circonstance de la commensurabilité exacte se reproduit périodiquement; cela est bien conforme à ce qu'avait présumé Newcomb [1] ».

Origine des fortes inclinaisons et des fortes excentricités. — En général, les orbites de ces astéroïdes sont peu inclinées sur le plan de l'écliptique, mais 25 d'entre elles ont des inclinaisons supérieures à 20°; de même, la plupart d'entre ces orbites sont peu excentriques; mais, cependant, pour un dixième d'entre elles, l'excentricité est considérable entre 0,25 et 0,30.

Il est donc naturel d'admettre qu'à l'origine tous les astéroïdes ont été lancés dans des orbites peu inclinées et peu excentriques, et qu'ensuite les inclinaisons et les excentricités de quelques-uns d'entre eux ont pu croître notablement sous l'influence perturbatrice de Jupiter.

Fortes inclinaisons. Le Verrier. — Le Verrier s'est posé la question en ce qui concerne les inclinaisons : il est arrivé à cette conclusion qu'en effet une petite masse lancée, à une distance du Soleil double de celle de la Terre, dans une orbite peu inclinée sur l'écliptique, pouvait sortir de son orbite primitive et acquérir de grandes

---

[1] MASCART, *Question des petites planètes*, p. 30.

inclinaisons. Mais la distance 2 est la limite intérieure de l'anneau des astéroïdes; cette remarque curieuse explique donc la limitation intérieure de l'anneau, ce qui est fort important, mais nullement les fortes inclinaisons trouvées dans son intérieur.

Fortes excentricités. Tisserand. — Plus tard, Tisserand a fait une recherche analogue pour les excentricités, et il a constaté l'existence, à cet égard, d'une région analogue d'instabilité, mais qui répond à une distance encore plus petite, 1,83, du Soleil.

Ni l'un ni l'autre de ces travaux n'aboutit donc à un résultat positif. Nous reprendrons cette question plus loin d'une autre manière.

Le mode de formation des astéroïdes se rattache au mode général de formation du système solaire : Laplace. — On trouve dans l'*Exposition du système du Monde* quelques lignes de Laplace relativement au mode de formation des astéroïdes. On sait que, d'après ce grand géomètre, la nébuleuse solaire, en se contractant, a abandonné dans la zone équatoriale une succession d'anneaux, relativement minces et étroits, qui ont continué à circuler autour du Soleil. Chacun de ces anneaux tournait tout d'une pièce par suite du frottement réciproque des molécules qui avait égalisé leur vitesse angulaire, très faible d'ailleurs; d'un anneau à l'autre la vitesse variait en conformité de la loi des aires. Enfin chacun des anneaux, en équilibre fort instable, s'étant rompu sous l'influence de causes quelconques, les débris se sont agglomérés, soit en plusieurs masses distinctes, soit en une seule assez puissante pour attirer toutes les autres. « Ce dernier cas, dit Laplace, est le plus commun; cependant le système solaire nous offre le premier cas dans les quatre petites planètes qui circulent entre Mars et Jupiter. »

Pendant tout le siècle dernier les astronomes ont négligé cette assertion de Laplace; mais, aujourd'hui, le nombre des astéroïdes dont les orbites sont connues est assez grand pour nous donner peut-être un moyen de la vérifier et même de la compléter.

De Freycinet. — C'est cette œuvre qu'a tentée tout récemment (1900) M. de Freycinet; et voici comment il y arrive. Tout d'abord, étant donné le grand nombre probable des astéroïdes, il est difficile

d'admettre qu'ils proviennent de la dislocation d'un seul anneau : il est bien plus vraisemblable que, dans la zone qu'ils occupent, il existait à l'origine une série d'anneaux minces et concentriques au Soleil dont ils constituent les débris.

D'un autre côté il paraît bien certain que, si des anneaux ont réellement existé à une époque quelconque, la distribution actuelle des astéroïdes doit se ressentir de cette phase préliminaire ; c'est donc cette distribution qu'il convient d'étudier tout d'abord.

Pour cela M. de Freycinet ordonne les 428 astéroïdes dont les orbites étaient connues à l'époque de ses travaux (*Annuaire du Bureau des Longitudes* pour l'année 1900) suivant l'ordre de leurs distances au Soleil et trouve dans l'espace de 2,08 à 4,27 sept bandes séparatives, correspondant à huit anneaux distincts de densités d'ailleurs très différentes [1], qui lui représentent la configuration de l'amas planétaire des astéroïdes ; les données résultantes sont comprises dans le tableau suivant (colonnes 2 et 3).

	Distance au Soleil.				Excentricité moyenne.			
Anneau.	Ex.	In.	Largeur [2].	Nombre d'astéroïdes.	Moitié Ex.	Moitié Int.	Théorique.	Réelle.
1....	4,27	3,91	0,36	5	0,080	0,135	0,125	0,124
2....	3,91	3,69	0,22	1	»	»	»	»
3....	3,69	3,37	0,32	12	0,115	0,145	0,133	0,133
4....	3,37	3,09	0,28	70	0,114	0,140	0,127	0,129
5....	3,09	2,84	0,25	69	0,128	0,128	0,125	0,128
6....	2,84	2,55	0,29	170	0,147	0,167	0,150	0,156
7....	2,55	2,30	0,25	73	0,150	0,166	0,148	0,158
8....	2,30	2,08	0,24	28	0,123	0,146	0,137	0,136
Totaux.....				428				
Moyennes.....			0,274		0,123	0,147		

Cette constitution répond-elle à celle qui résulte de la théorie générale de Laplace? Telle est la question à résoudre actuellement.

Pour cela il faut avant tout bien définir les conditions initiales du Problème, c'est ce que M. de Freycinet fait comme il suit : « Je réduirai l'hypothèse de Laplace à ses termes les plus simples. Je

(1) Ces anneaux sont compris dans ceux qu'ont indiqués plus tard Bauschinger et Stroobant.

(2) La largeur indiquée ici comprend le vide séparatif, d'autre part ; la largeur théorique moyenne indiquée par M. de Freycinet est 0,284.

supposerai qu'il y a eu, à l'origine, solidarité entre les corpuscules, ou embryons d'astéroïdes, engagés dans un même anneau; ceux-ci, pendant la rotation, gardaient leurs positions relatives comme s'ils faisaient partie d'un même solide géométrique. La vitesse angulaire, très faible en tous cas, était telle que sur la face extérieure de l'anneau, les molécules satisfaisaient à la condition d'égalité de Laplace entre la force centrifuge et l'attraction solaire. Les molécules situées à l'intérieur de l'anneau possédaient nécessairement des vitesses linéaires moindres, puisqu'elles avaient la même vitesse angulaire et qu'elles étaient plus voisines du Soleil. Le système formé par ces particules était donc dans un état d'équilibre instable, devant conduire à sa dislocation. Après cette première phase, les phénomènes complexes, qui ont marqué cette dislocation et l'agrégation de sa matière en plusieurs masses distinctes, seront résumés ici en un seul. J'admettrai que dans le même instant, le soi-disant solide géométrique s'est brisé de toutes parts et que chaque astéroïde, à un état de formation plus ou moins avancé, a cédé librement à l'attraction solaire. Il a, dès lors, décrit une courbe elliptique dont l'aphélie coïncide avec le point précis où il se trouvait quand la rupture s'est produite. Les corpuscules voisins de la surface extérieure ont pu continuer à parcourir des cercles ou des orbites presque circulaires, s'ils ont été peu dérangés de la position d'équilibre. »

Ceci posé voyons les conséquences d'un tel mode de formation :

1° Chaque anneau s'étant formé dans des conditions telles qu'il y avait, ou peu s'en faut, équilibre sur sa face extérieure entre la force centrifuge et l'attraction solaire, les molécules voisines de cette face étaient animées de mouvements qui s'écartaient peu du mouvement circulaire, et, par conséquent, les planètes engendrées dans cette région doivent parcourir des orbites d'excentricité relativement faible par rapport à celles des astéroïdes ayant pris naissance sur la face intérieure de l'anneau. Pour vérifier cette induction, M. de Freycinet a partagé chaque anneau par le milieu de sa largeur et a calculé l'excentricité moyenne relative à chacune de ces moitiés; les résultats de ce calcul sont inscrits dans les colonnes 6 et 7 du Tableau précédent. Chaque valeur (sauf pour l'anneau 5 où il y a égalité) de l'excentricité moyenne y est en effet plus grande dans la moitié intérieure que dans la moitié extérieure, et la différence entre les moyennes atteint le sixième de la plus grande des deux.

2° Dans l'hypothèse de pluralité originelle des anneaux dans cet amas planétaire, l'excentricité moyenne des astéroïdes situés dans la partie intérieure d'un anneau déterminé doit être plus grande que l'excentricité moyenne dans la partie extérieure de l'anneau qui le précède par rapport au Soleil. C'est ce que vérifient (sauf peut-être pour l'anneau 8) les nombres des deux colonnes 6 et 7 que nous venons déjà d'utiliser.

3° D'autre part, une savante analyse a permis à M. de Freycinet de calculer les excentricités théoriques moyennes de chacun de ces anneaux et leur largeur théorique moyenne. Les colonnes 4, 8 et 9 du Tableau, où sont inscrites les valeurs réelles et les valeurs théoriques, montrent toute la concordance de ces deux ordres de résultats [1].

Les prévisions de la théorie sont donc vérifiées par leur comparaison avec l'observation et, comme conséquence de son laborieux travail, M. de Freycinet arrive à cette conclusion remarquable :

« Conformément aux idées de Laplace, les planètes télescopiques paraissent s'être formées successivement dans plusieurs couches sphériques concentriques au Soleil. Dans chacun de ces anneaux, la matière cosmique a été animée à l'origine d'un mouvement de rotation commun, variable d'un anneau à l'autre, et a donné naissance, après la rupture, à plusieurs masses distinctes. »

La constitution, au premier abord étrange, de ce système d'astricules, résulte donc de la même loi générale qui régit non seulement le monde solaire, mais aussi l'univers stellaire, et c'est là un point fort intéressant ; mais doit-on en conclure que les deux planètes qui l'entourent, et surtout Jupiter, le sous-soleil de notre système, n'ont eu aucune influence ultérieure sur leur distribution relative dans l'espace qui leur était ainsi laissé?

Relations entre les orbites des astéroïdes et Jupiter. S. Newcomb. Callandreau. — Newcomb a prouvé théoriquement (1862) que telle n'était pas la vérité : calculant les actions attractives de Jupiter sur le groupe des astéroïdes, il a démontré que cette

---

[1] Il convient cependant de signaler particulièrement l'exception à la première loi relative au cinquième anneau, exception qui semblerait indiquer des circonstances particulières dans son mode de formation; en effet, chose curieuse, elle correspond à fort peu près à la distance résultant de la loi de Bode pour la planète hypothétique qui aurait seule remplacé tout ce système.

action devait déterminer une orientation générale de leurs orbites sur celle de Jupiter et qu'en conséquence, leurs plans ont dû se rapprocher de celui de Jupiter, de manière à coïncider le plus possible avec le sien et, en même temps, leurs grands axes, prendre dans ce plan une direction aussi voisine que possible de celui de Jupiter dans le sien. Il a donc dû y avoir une sorte de condensation des nœuds et des périhélies des astéroïdes vers le nœud et le périhélie de Jupiter.

A cette époque on ne connaissait les orbites que de 57 astéroïdes, la vérification expérimentale était donc incomplète; mais aujourd'hui le nombre en est assez grand pour la permettre; et c'est ce qu'ont fait Bauschinger et Callandreau. S'appuyant sur les orbites de 480 astéroïdes, ils ont montré que :

1° La distribution des nœuds des orbites des astéroïdes est très sensiblement symétrique par rapport à celle de Jupiter. De même, si les plans de toutes ces orbites coïncidaient avec celle de Jupiter, leurs axes seraient distribués symétriquement par rapport au sien.

2° Mais la distribution des nœuds et des périhélies n'est pas uniforme autour de Jupiter.

Pour les nœuds on en trouve 267 dans le demi-cercle qui a pour milieu celui de Jupiter et 215 dans le demi-cercle opposé, soit 0,55 pour le premier et 0,45 pour le second.

Pour les grands axes, il y a 298 périhélies dans le premier et 164 dans le second, soit une proportion de 0,64 contre 0,36.

Ces rapports sont assez sensiblement d'accord avec ceux qu'indique la théorie de Newcomb pour qu'ils puissent lui servir de vérification. Mais on peut faire mieux apprécier l'action d'orientation de Jupiter en la localisant. Il est certain que cette action s'exerce surtout sur les astéroïdes les plus voisins de lui; considérons donc à part les 17 astéroïdes du groupe jovien de Bauschinger.

Onze des nœuds de leurs orbites sont compris dans le premier demi-cercle et six dans le second, soit une proportion de 0,65 contre 0,35; quant aux périhélies, on en trouve douze dans le premier et cinq dans le second, soit une proportion de 0,71 contre 0,29.

D'autre part, une statistique analogue montre qu'en moyenne les ellipses décrites par ces astéroïdes autour du Soleil s'allongent vers Jupiter au fur et à mesure que ces orbites se rapprochent de la sienne, leurs excentricités variant dans le rapport de 1 à 3 (de 0,075 à 0,212),

alors que les distances moyennes au Soleil ne varient que dans le rapport de 1 à 1,3. D'ailleurs les inclinaisons moyennes restent sensiblement constantes.

Ainsi, d'une part, les orbites d'un certain nombre de ces astéroïdes ont une orientation voisine de celle de Jupiter; et, d'autre part, à mesure qu'elles s'approchent de Jupiter ces orbites envoient, vers cette planète dominatrice, une portion de plus en plus grande d'elles-mêmes.

C'est à cette action, d'ailleurs importante, que se réduit le rôle de Jupiter dans le petit monde que nous étudions.

Résumé. — En résumé, la constitution actuelle de l'ensemble formé par les astéroïdes ne diffère que peu de la constitution que lui donnait à l'origine le mode général de formation du système planétaire tout entier; l'anomalie apparente qu'il présentait fournit au contraire une preuve nouvelle, et des meilleures, en faveur de la magnifique synthèse que Laplace a donnée comme base hypothétique à la formation de notre système planétaire.

VI. — Parenté des astéroïdes.

Analogie des éléments : J. Mascart. — Ce mode de formation porte à croire qu'un certain nombre des astéroïdes doivent parcourir des orbites peu différentes et avoir ainsi des liens de parenté directe.

Il existe, en effet, ainsi que l'a montré M. J. Mascart, un certain nombre de ces astres, dont les orbites présentent « des analogies curieuses, des quasi-identités d'éléments difficilement imputables au hasard » et qui d'ailleurs, comme le montre le calcul, se maintiendront indéfiniment. C'est ainsi qu'on trouve huit couples d'astéroïdes dont les orbites sont presque les mêmes. Je citerai, comme exemple, Clotho et Junon :

Clotho (97) .. $a = 2,671$ $e = 0,2549$ $i = 11°45'$ $\omega = 65°31'$ $\Omega = 166°36'$
Junon (3) .. $a = 2,668$ $e = 0,2578$ $i = 13°\ 1'$ $\omega = 54°50'$ $\Omega = 170°53'$

Vingt-deux couples ont quatre éléments presque identiques, par exemple Fidès (37) et Maïa (66) qui ne diffèrent que par l'orientation du grand axe.

Soixante-dix couples ont trois éléments communs et près de quatre cents en ont deux : il convient de signaler en même temps cette remarque curieuse, due à Tisserand, que les orbites à forte inclinaison ont presque toujours une forte excentricité, et réciproquement.

En serrant de près cette question M. J. Mascart a montré que le nombre des coïncidences constatées entre les éléments des astéroïdes était de beaucoup supérieur à celui qu'assignerait le calcul des probabilités; il semble donc exister une raison cosmogonique qui prédispose à ces coïncidences d'éléments; en d'autres termes, *il paraît y avoir eu, à leur formation, des liens de parenté entre un grand nombre des composantes de l'ensemble des astéroïdes.* C'est une confirmation de la théorie de M. de Freycinet.

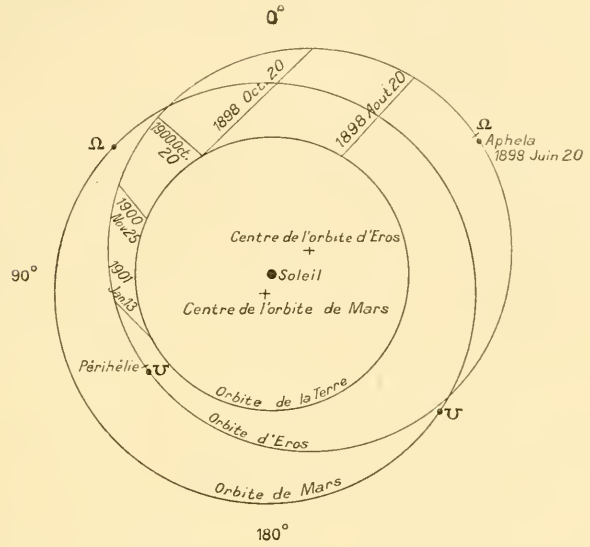
VII. — Éros et 1906 T.-G.

1° *Éros.* — Depuis l'application de la Photographie à la recherche des petites planètes, les découvertes se sont succédé très rapidement, si bien qu'actuellement le nombre total de ces astéroïdes connus surpasse un peu 600. Mais ces acquisitions se sont, en général, rangées dans les cadres précédents, sans en modifier sensiblement la disposition et en étendant ou accentuant les régions de fortes densités. Seules deux d'entre elles offrent un grand et réel intérêt.

La première en date est la planète qu'on a appelée *Éros;* découverte le 13 août 1898 par M. Witt, de l'observatoire Urania de Berlin, elle appela immédiatement l'attention par sa marche rétrograde tout à fait inusitée de 2^{m} par jour en ascension droite. Son orbite, bientôt calculée par M. Berberich, offre, en effet, un caractère absolument inattendu. Faisant partie de ce que M. Berberich appelle l'*anneau Martien,* cet astéroïde se rapproche beaucoup plus du Soleil que les autres membres de ce groupe, si bien que sa distance moyenne au Soleil, 1,46, est moindre que celle de Mars, 1,52, et que, si l'on s'en tenait à ce simple résultat numérique, on devrait le considérer comme étranger à l'ensemble des astéroïdes circulant entre Mars et Jupiter. Mais il s'y rattache forcément par l'ensemble de ces caractères : ses dimensions sont, comme les leurs, excessivement faibles; en lui supposant un albedo égal à celui de Pallas, son diamètre serait de 27^{km} et sa masse $\frac{1}{2000000}$ de celle de la Lune.

D'autre part (*fig.* 53), son orbite est très excentrique, la distance de son centre à son foyer étant le cinquième (0,23) du demi-grand axe, et sa distance au Soleil est très variable.

Fig. 53.



Au périhélie, elle n'est que de 1,13 et ne surpasse que d'un peu plus de $\frac{1}{10}$ la distance moyenne de la Terre au Soleil. L'orbite de la Terre n'est alors séparée de celle de ce petit astre que de 0,12, tandis qu'aux passages les plus favorables Vénus en est encore distante de 0,27 et qu'à ses oppositions les plus favorables Mars s'en éloigne de 0,38. Éros est donc, à certaines époques, notre plus proche voisin parmi tous les corps qui composent le système solaire.

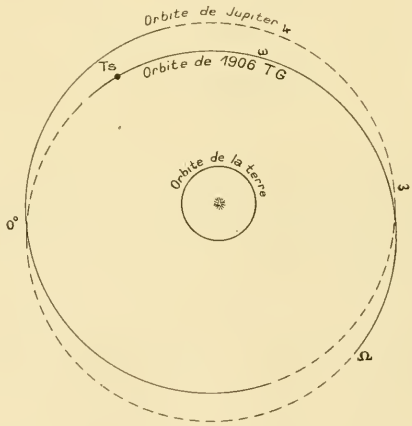
Cette grande variabilité de distance amène une variabilité correspondante dans son éclat apparent qui passe de la 6,5e grandeur à la 13e grandeur et, d'un autre côté, l'action perturbatrice que la Terre exerce sur son mouvement autour du Soleil doit être considérable. Aussi, certains astronomes ont-ils émis l'opinion que cette planète aurait été introduite récemment dans le système solaire par cette action attractive, qu'il y aurait là un effet de capture par la Terre, analogue à celui des comètes par Jupiter [1]. Mais il faudrait pour

[1] M. Dziewulski, de Cracovie, trouve de son côté qu'en l'an 7500 avant notre ère,

cela que son orbite s'approchât de la nôtre beaucoup plus près que ne l'indique l'orbite du Dr Berberich et l'on doit considérer Éros comme faisant partie du système solaire dès l'origine; et alors il y a lieu de se demander si réellement la formation de ces petits astres est limitée, comme on l'a pensé jusqu'ici, à la région céleste comprise entre Mars et Jupiter et si, au contraire, elle ne s'étendrait pas en deçà de Mars vers la Terre.

2° 1906 *T.-G.* — L'autre planète, que l'on désigne par le symbole 1906 T.-G., a été découverte le 22 février 1906, à Heidelberg, par M. Kopff, assistant de M. Wolf à l'observatoire de Königsthul, et s'est fait distinguer de suite par la lenteur relative de son mouvement parmi les étoiles. L'orbite, qu'en a calculée aussitôt le Dr Berberich, lui assigne une durée de révolution de $12^{\text{ans}},02$, presque égale à celle de Jupiter ($11^{\text{ans}},86$), en même temps qu'une distance moyenne au

Fig. 54.



Soleil (*fig.* 54) de 5,248, un peu supérieure à celle 5,203 de Jupiter; cette nouvelle planète prolongerait donc au delà de Jupiter l'anneau Jovien des astéroïdes. Son orbite provisoire lui donne une forte excentricité ($e = 0,168$) et, par conséquent, sa distance au Soleil

l'orbite d'Éros a rencontré celle de Mars et que, fort probablement alors, ces deux planètes furent très voisines l'une de l'autre. La forme et la position actuelles de l'orbite d'Éros seraient, d'après lui, dues aux perturbations résultant de cette circonstance.

serait très variable : de 4,37 au périhélie, elle atteint 6,13 à l'aphélie : une portion de son orbite serait donc extérieure à celle de Jupiter, l'autre lui étant intérieure. Mais ces deux orbites ne sont jamais fort proches, car, aux deux endroits où elles paraissent se couper sur notre figure, l'une (trait plein) est au nord de l'écliptique, tandis que l'autre (trait ponctué) est au sud (inclinaison 10°).

Quelles sont les dimensions de cet astéroïde d'allure un peu extraordinaire? Quoiqu'en raison de la grande distance qui le sépare de nous, il nous apparaisse comme un astre de très faible éclat (14e à 15e grandeur), il est, néanmoins, l'un des gros de leur ensemble : en lui supposant le même albedo que Pallas, son diamètre serait d'environ 160km, c'est-à-dire à peu près le cinquième de celu de Cérès, le plus volumineux de tous, d'après Barnard.

La presque égalité des durées de révolution de Jupiter et de la planète T.-G., on pourrait même dire leur égalité, étant donnée l'incertitude qui règne forcément encore sur la valeur de celle de la planète, est un fait très remarquable; et, chose plus curieuse encore, c'est qu'en 1772, bien avant que l'on connût un seul astéroïde, Lagrange en a donné l'étude théorique dans son *Essai sur le problème des trois corps :* « Étant donnés trois corps A, B, C qui s'attirent en raison directe des masses et en raison inverse du carré des distances, déterminer leurs positions respectives à une époque quelconque », tel est l'énoncé de ce problème. En général, sa solution exacte est au-dessus des ressources actuelles de notre analyse mathématique. Mais il est un cas particulier très intéressant (1) où celle-ci en donne une solution exacte; c'est lorsque les centres des trois corps forment un triangle équilatéral. Dans ce cas, que Lagrange n'étudie qu'à titre *de pure curiosité*, il démontre que deux des corps, B et C, tout en continuant à former avec A un triangle équilatéral, décrivent autour de lui, dans le plan des trois, des ellipses, comme ils le feraient s'ils étaient chacun seul soumis à l'attraction de A; ces ellipses sont égales et leurs axes font entre eux un angle de 60°. Si la réalisation rigoureuse des conditions de Lagrange était nécessaire, sa recherche ne serait que pure curiosité, mais il ajoute que, si les dis-

(1) Il y a, en réalité, un autre cas, mais dont il n'y a pas lieu de s'occuper ici, où l'on obtient aussi une solution rigoureuse : c'est celui où les trois corps sont en ligne droite, second cas limite du triangle ABC dont, dans son Mémoire, Lagrange cherche à déterminer les transformations.

tances respectives des trois corps, au lieu d'être égales et constantes, sont variables, mais s'écartent très peu des valeurs que la condition précédente exige, il est clair que le problème sera résoluble à peu près et par les méthodes d'approximation connues. Tout récemment, M. Charlier, de l'observatoire de Lund, a étudié ce cas beaucoup plus général que le premier et a démontré que, si le triangle formé par les trois corps n'était pas équilatéral, sans cependant s'en écarter beaucoup, on aurait un mouvement oscillatoire du système tout entier ne s'éloignant jamais beaucoup du mouvement théorique de Lagrange. En conséquence, dans tous les cas voisins du cas théorique, le système formé par les trois corps est un système stable devant avoir eu et devant conserver indéfiniment le même mouvement relatif, à moins qu'une cause perturbatrice, comme l'arrivée d'un quatrième corps, n'en vienne troubler l'équilibre.

Or, M. Charlier remarque qu'à l'époque de sa découverte (1906 février 22,5), la distance angulaire de T.-G. à Jupiter était de 55°30′, très voisine de 60°, d'autre part, l'égalité des durées de révolution entraînant celles des rayons vecteurs au Soleil, le triangle formé par le Soleil, Jupiter et T.-G. est bien près d'être un triangle équilatéral, et le plan de son orbite n'est incliné que de 9° sur celui de Jupiter; c'est-à-dire qu'il se trouve dans les conditions indiquées par Charlier, pour que le théorème de Lagrange lui soit applicable. La trajectoire de la planète T.-G. a donc, depuis la formation du système d'astéroïdes, et les conservera indéfiniment, à moins d'action extérieure nouvelle, sa position, sa forme et ses dimensions actuelles.

Ajoutons que deux autres astéroïdes, du groupe Jovien également, découverts en 1906 et qu'on a désignés par XM et VY, sont, d'après le Dr Strömgren, dans les mêmes conditions que T.-G. par rapport à Jupiter. XM serait à 18°54′ du point équilatéral du côté de Jupiter dont la longitude est supérieure à la sienne, tandis que VY serait seulement à 5°57′ du point équilatéral du côté opposé de Jupiter.

Conclusion. — En résumé, la découverte de ces astéroïdes remarquables nous rejette bien loin, non seulement du sentiment de vide exprimé par Kepler et précisé par la loi de Bode, sentiment qui a amené les astronomes à rechercher une planète inconnue entre Mars et Jupiter, mais aussi de la conception qu'on se faisait, il y a seulement quelques années, de cet ensemble d'astéroïdes : nous ne devons

plus le considérer comme renfermé dans des limites bien déterminées, celles des orbites de Mars et de Jupiter, mais nous devons nous attendre à rencontrer bientôt de nouveaux membres de cette famille, tout aussi bien en deçà de Mars, et sans doute encore plus près de nous qu'Éros, qu'au delà de Jupiter, la géante de notre système. En sorte que, au lieu d'être vide, comme on le pensait autrefois, cette région de notre système solaire serait, au contraire, la plus remplie et ce par un nombre énorme de petits corps séparés, groupés par anneaux successifs à des distances très différentes de l'astre central.

VIII. — Utilité astronomique des astéroïdes.

Considérations générales. — L'anneau des astéroïdes pris dans son ensemble offre donc, au point de vue cosmogonique, un intérêt qui suffirait seul à faire comprendre l'immense somme d'efforts que continuent à faire les astronomes du *Berliner astronomisches Jahrbuch* pour maintenir les déterminations de leurs orbites de niveau avec les découvertes qui se succèdent de plus en plus rapidement. Mais il y a d'autres motifs, et d'objet plus immédiat, à tous ces travaux.

Parallaxe du Soleil. — Les astéroïdes, qui s'approchent beaucoup de la Terre, peuvent servir à déterminer avec précision la parallaxe du Soleil. Ce procédé, recommandé il y a près d'un demi-siècle par l'astronome Galle de Berlin, appliqué depuis très fréquemment et en particulier par Gill et Elkin, vient de trouver dans Éros un moyen vraiment inespéré d'exécution. En effet, en raison de la grande excentricité de son orbite, cet astéroïde peut s'approcher de la Terre jusqu'à 0,116 seulement, tandis que Vénus ne descend pas au-dessous de 0,255. On a ainsi un astre à une distance de la Terre beaucoup moindre que Vénus lors de ses conjonctions inférieures les plus favorables.

Masse de Jupiter. — Il est, vers la limite extérieure de l'anneau, des astéroïdes qui peuvent arriver très près de Jupiter et, subissant alors de sa part des perturbations considérables, sont très utiles pour en déterminer la masse.

Telle est la planète Thulé (279) qui, en 1912, s'approchera de Jupiter jusqu'à la distance 1 ; l'attraction de cette planète sera alors supérieure au cinquantième de celle du Soleil ; l'étude de son mouvement permettra donc de déterminer avec une grande précision la masse de la planète perturbatrice. C'était, jusqu'en ces derniers temps, l'astéroïde le plus favorable à ce genre de recherches ; les nouveaux astres découverts dans le groupe Jovien étendent beaucoup les limites de ces travaux.

Étude physique. — Enfin certains astéroïdes, soit par suite de leurs dimensions, soit par leur grande proximité de la Terre à un moment donné, peuvent se prêter commodément à des recherches photométriques devant nous éclairer singulièrement sur les conditions physiques de ces astricules. C'est ainsi que, dans son opposition de 1901-1902, la planète Éros a donné lieu, comme nous l'avons vu plus haut, à des recherches du plus grand intérêt.

—

CHAPITRE IV.

JUPITER.

Cette planète, dont l'observation fut, pour Galilée, la première démonstration de l'importance astronomique des nouveaux appareils optiques qu'il avait construits, marque dans le système solaire le commencement d'un régime très différent de celui que nous avons étudié jusqu'ici.

Très grosse, son diamètre étant onze fois celui de la Terre, et sa masse atteignant la millième partie de celle du Soleil, elle est un facteur dont il y a lieu de tenir grand compte dans l'étude détaillée des chemins que suivent les astres qui s'en approchent.

D'un autre côté, son albedo considérable 0,72, presque comparable à celui de Vénus, prouve qu'elle est entourée d'une atmosphère assez dense; et sa densité moyenne, très voisine de celle de l'eau, montre que sa constitution diffère beaucoup de celle de Vénus et des quatre premières planètes.

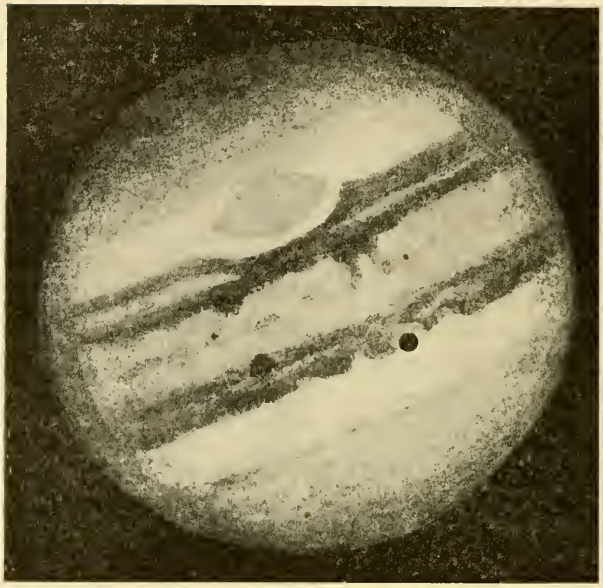
Jusqu'à une grande profondeur Jupiter serait donc à un état intermédiaire entre l'état liquide et l'état gazeux : comparativement aux planètes précédentes, celle-ci paraît bien moins avancée dans son évolution.

I. — Bandes équatoriales.

Le caractère le plus saillant et le plus permanent de Jupiter est l'existence des bandes équatoriales de Zucchi et Fontana, qui ont servi à la première démonstration de la rotation de cette planète et à la première détermination de sa durée ($9^h 55^m$) (*fig.* 55 et 56).

Leur portion fondamentale, toujours visible sur le fond plus lumineux du disque de la planète, se compose en général de deux larges bandes sombres parallèles à l'équateur, comprenant entre elles une zone brillante de largeur moyenne d'à peu près $\frac{1}{15}$ du diamètre de

Fig. 5



1899, 30 mai. — $9^h 5^m$. — (E.-M. Antoniadi).

Fig. 56.

1899, 4 juin. — $9^h 0^m$. — (G. Flammarion).

Dessins de Jupiter faits à Juvisy.

Jupiter et que certains observateurs, comme Tacchin en 1873 et de Gothard en 1883, signalent comme généralement colorée en rouge faible de rouille. Leurs bords extérieurs sont en général bien définis et parallèles à l'équateur. Leurs bords intérieurs sont au contraire assez irréguliers et forment comme une série de baies et de caps.

Ces bandes changent de forme d'une façon, en général, graduelle et progressive, mais parfois aussi en un petit nombre de jours.

Ces modifications sont toujours simultanées sur chaque bord des deux bandes : la matière qui les forme a ainsi de part et d'autre de l'équateur un mouvement de direction opposée qui les en rapproche ou les en éloigne en même temps, de telle sorte qu'elles se rétrécissent ou s'élargissent simultanément, en même temps que leurs milieux se rapprochent ou s'éloignent de l'équateur. Dans certaines oppositions, comme 1879 et 1882, ces deux bandes se sont réunies en une seule, d'un blanc grisâtre et symétrique par rapport à l'équateur.

Cette dépendance des deux bandes équatoriales s'accuse encore dans leurs variations de couleur. Pendant la durée (12 ans) de la révolution de Jupiter, elles passent périodiquement et simultanément du rouge au blanc bleuâtre; mais ces variations s'y produisent en sens inverse, le maximum du rouge de l'une correspondant à la teinte bleuâtre de l'autre et inversement.

De chaque côté de l'équateur et au delà des deux principales sont des bandes sombres plus faibles, de même direction, séparées aussi des premières et les unes des autres par des zones plus brillantes; leurs grandeurs et leurs positions sont variables et parfois assez rapidement; elles ont toujours été notées comme sombres et sans coloration sensible et elles ne s'étendent guère au delà de 40° de latitude jovienne. D'ailleurs, par suite de la sphéricité de la planète et de son éloignement, nous ne sommes que peu ou mal renseignés sur sa surface au delà de 60° à 65° (2″ du limbe); les objets qui peuvent y exister nous sont alors pratiquement invisibles : nous savons seulement que les régions voisines des pôles se distinguent, en général, par une nuance plus claire.

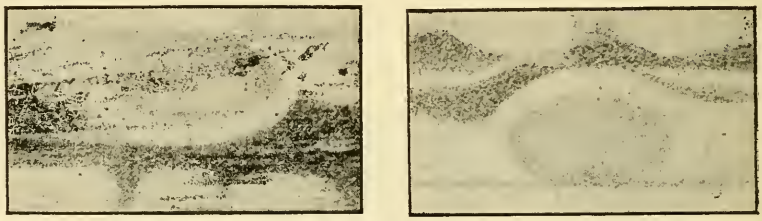
II. — Grande tache rouge.

J.-D. Cassini. Maraldi. — Une autre apparence caractéristique de Jupiter est ce qu'on a appelé *la grande tache rouge,* découverte

par J.-D. Cassini en 1664 sur le bord inférieur de la bande équatoriale australe. Après l'avoir suivie jusqu'au commencement de 1666, époque où Jupiter arrivait en conjonction, il la revit en janvier 1672, puis en 1677 au même endroit du disque. Maraldi la retrouve en 1708 et l'observe jusqu'en janvier 1709; mais à l'opposition suivante elle avait de nouveau disparu et nous sommes ensuite sans renseignements sur elle jusqu'aux années 1857-1858; on la revit aussi en 1870, 1871 et 1873; mais elle ne fut sérieusement étudiée qu'à partir de l'opposition de 1878.

Niesten. Lohse. Hough. Denning. — Niesten et Lohse signalèrent à cette époque l'apparition d'un nuage rosé qui se montrait au-dessous de la bande méridionale, dans la zone blanchâtre qui la surmonte, précisément à la place qu'occupait la tache de Cassini : c'était en effet le commencement de son apparition. Elle fut dès lors suivie avec soin, surtout (1878-1901) par Hough et Denning.

Fig. 57.



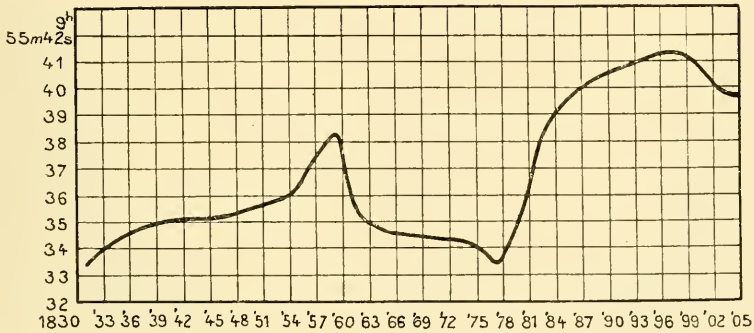
Lorsqu'elle se projette au milieu du disque elle a la forme (*fig.* 57) d'un ovale très allongé (à peu près dans le rapport de 2 à 1) dans le sens de l'équateur jovien; au moment de son maximum d'étendue apparente cette tache avait 11″,6 de longueur et 3″,9 de largeur, soit 200000^{km} de long sur 67000^{km} de large. Ce qui frappe le plus en elle ce sont : la coloration rouge brun qui, la plupart du temps, la teinte uniformément, mais qui disparaît parfois pendant un assez long temps, et l'éclat de l'anneau elliptique blanc qui l'entoure complètement. Sa coloration et ses dimensions ont fait donner à cette tache le nom de *grande tache rouge*.

Cette tache, toujours voisine du bord sud de la bande méridionale qu'elle semble courber et rétrécir sans jamais en faire partie, est la plus stable de toutes les inégalités lumineuses que montre le disque

de la planète. A l'inverse des bandes, elle reste sensiblement à la même distance de l'équateur; ni sa forme, ni ses dimensions n'ont varié sensiblement pendant les 23 ans qu'ont duré les observations et mesures micrométriques de Hough; de même elle est toujours restée visible, mais parfois si faiblement que, si l'on n'avait pas été prévenu de la position qu'elle devait occuper, elle aurait semblé avoir disparu, comme cela avait été indiqué par Maraldi avec les instruments peu puissants dont il disposait.

Ses mouvements en latitude et longitude. Variabilité de la durée apparente de rotation. — Cependant cet objet n'est pas absolument fixe sur le disque; en 23 ans il s'est déplacé de $1'',7$, soit 29000^{km} en latitude; de même la durée de sa rotation n'est pas constante, ainsi que cela résulte des travaux si intéressants de Denning et de Hough (*fig.* 58); d'après ces deux astronomes elle aurait varié de près de 10 secondes depuis 1830.

Fig. 58.



En 1830 elle est, en effet, égale à $9^h 55^m 33^s,4$; à partir de là elle augmente à peu près régulièrement jusqu'en 1859 où elle atteint $55^m 38^s,3$, diminue ensuite jusqu'en 1877, $55^m 33^s,5$; à partir de cette époque elle augmente jusqu'en 1898, où elle est de $55^m 41^s,7$, et diminue alors rapidement jusqu'en 1905, et pour rester sensiblement stationnaire jusqu'en 1906.

Son invariabilité de forme et de position relative. Son état. — L'invariabilité relative de forme et de position de cette grande tache que constate Hough permet d'en conclure à la même stabilité depuis

que Cassini l'a vue le premier il y a plus de deux siècles; et cette stabilité paraît indiquer qu'on a affaire là à un ensemble matériel indépendant, de dimensions d'ailleurs considérables ([1]); d'autre part, il est suffisamment dense pour porter ombre sur le disque lorsque, amené par la rotation un peu loin du centre, il est éclairé obliquement par le Soleil.

Sa constitution superficielle diffère beaucoup de celle des bandes, comme le prouve une curieuse observation de Hough. Cet astronome eut en 1880 la bonne fortune de pouvoir observer le passage d'un satellite sur la grande tache rouge; « invisible jusque-là sur la portion lumineuse de la bande équatoriale qu'il traversait (*fig.* 59), ce satellite devint, dès qu'il fut projeté sur la tache, aussi visible que lorsqu'il était en dehors du disque. Il redevint invisible dès qu'après avoir quitté la tache rouge, il rentra dans la zone lumineuse de la ceinture équatoriale.

Autres objets remarquables sur le disque de Jupiter. — On remarque sur le disque de Jupiter (*fig.* 59) bien d'autres singularités; presque toujours on y constate la présence d'inégalités lumineuses assez bien limitées, tantôt brillantes, tantôt obscures, auxquelles on a cependant donné le nom commun de *taches*.

On les rencontre jusqu'aux latitudes de 50° dans le sud et de 80° dans l'hémisphère nord. La plupart ont une durée de rotation voisine de celle de la grande tache rouge, et comprise entre $9^h 56^m 0^s$ et $9^h 55^m 8^s$. C'est la *longue période*. D'autres tournent beaucoup plus rapidement. Ainsi les taches brillantes de la zone équatoriale blanche (+ 11° à — 6°) tournent en $9^h 50^m$ environ, c'est la *courte période*, et même les nombreuses taches sombres signalées en 1880 et 1890 tout près de la bande équatoriale nord avaient une durée de rotation moindre encore et comprise entre $9^h 48^m$ et $9^h 49^m$.

Il ne paraît d'ailleurs exister aucune relation entre ces durées et les latitudes, deux taches à la même distance de l'équateur ayant souvent des durées de rotation assez différentes.

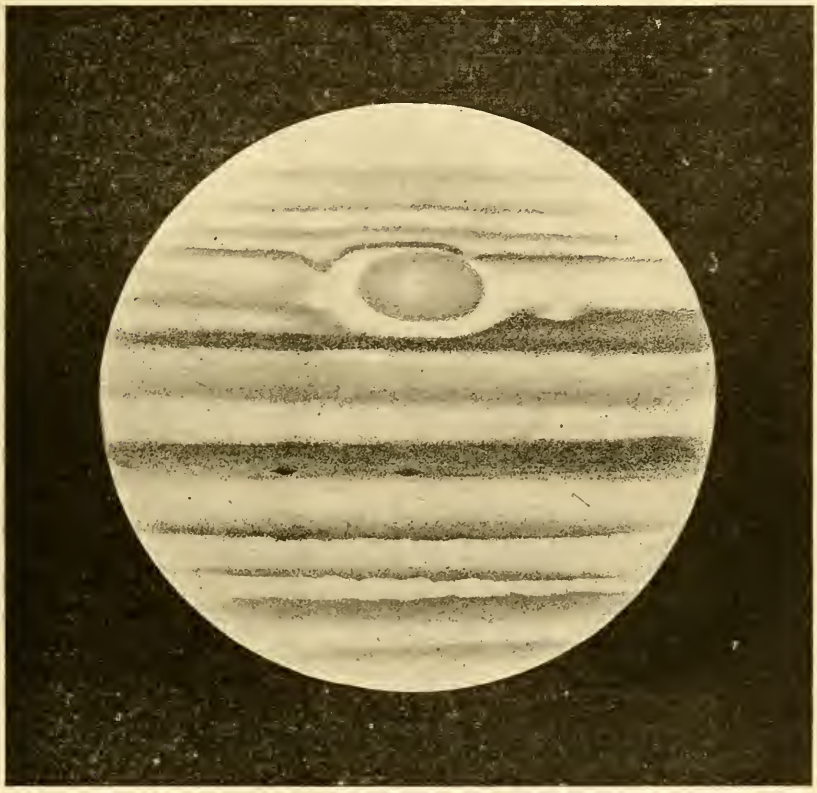
Elles ont en général d'assez grandes dimensions, comparables et

---

([1]) Si on lui suppose une épaisseur égale à la moyenne de ses deux autres dimensions, il résulte des nombres donnés plus haut que cet ensemble aurait un volume triple de celui de la Terre.

même supérieures à celles de la Terre et sont parfois d'une grande permanence, comme, par exemple, la grande tache équatoriale de 1880 qui a duré 6 ans et la tache remarquée en 1885 au bord nord de la bande équatoriale boréale, de mêmes dimensions que celles du satellite III, et qu'on a pu suivre pendant 9 années (1885-1894).

Fig. 59.



Dessin de Jupiter de Keeler.

Dans ces cas, et ceux analogues, leurs durées de rotation ont été soigneusement étudiées et l'on a toujours constaté qu'elles n'étaient pas constantes, mais que, comme pour la grande tache rouge, elles variaient périodiquement. La tache de 1885, par exemple, avait d'abord une rotation de $9^h 55^m 32^s$, mais à partir de 1888 son mouve-

ment s'est ralenti de façon à avoir, en 1890, une durée de $9^h 55^m 44^s$ pour s'accélérer ensuite jusqu'à la fin de 1893 ($9^h 55^m 36^s$), époque où elle a disparu dans le grand cataclysme survenu alors dans cette région de Jupiter.

Autre fait curieux : certains observateurs, Brett par exemple, ont vu certaines de ces taches brillantes porter ombre sur Jupiter, ombres assez prononcées pour qu'on en ait conclu qu'elles proviennent de corps de forme globulaire, isolés, assez opaques, mais cependant de densité peu différente de celle des parties supérieures de la planète, et flottant alors dans ce milieu d'une façon indépendante.

Explication de ces apparences. — Ainsi qu'on l'admet presque universellement, Jupiter doit être entouré d'une atmosphère très dense dans laquelle flottent des masses plus ou moins condensées; les parties brillantes de son disque correspondant à des masses relativement opaques et réfléchissantes, les zones sombres aux régions où cette atmosphère est relativement sereine et possède un moindre pouvoir réfléchissant. Cet énoncé paraît n'être pour ainsi dire que la traduction même des faits; cependant, il a une portée plus haute; il explique, en effet, les apparences suivantes constatées et bien étudiées par Beer et Maedler.

Observations de Beer et Maedler. — Au voisinage des bords du disque, à partir de 1 heure et demie environ en temps de la rotation de Jupiter, on n'aperçoit plus (dans les instruments d'alors) bientôt trace d'inégalité lumineuse, les bords de Jupiter sont d'une teinte grise uniforme. Il faut donc qu'alors il y ait eu diminution de l'éclairement des parties brillantes et augmentation de celui des parties sombres. C'est, en effet, ce qui doit avoir lieu dans la supposition ci-dessus. Les surfaces réfléchissantes, étant éclairées de plus en plus obliquement, nous renvoient de moins en moins de lumière; et, au contraire, les portions diaphanes de l'atmosphère, qui correspondent aux bandes sombres, doivent nous renvoyer d'autant plus de lumière qu'éclairées obliquement, leur profondeur augmente.

Vents alizés. Fontenelle. W. Herschel. — Pour expliquer le parallélisme à l'équateur de ces bandes brillantes et sombres, Fontenelle, et après lui W. Herschel, ont admis l'existence, dans les

régions équatoriales de Jupiter, de vents analogues à nos vents alizés : leur rôle principal serait, en effet, de réunir les vapeurs de l'atmosphère équatoriale en bandes ainsi distribuées; s'il n'est pas douteux que, quel que soit le mécanisme de sa formation, cette distribution par bandes parallèles soit un effet direct de la rotation de la planète, l'énoncé d'Herschel ne paraît pas s'appliquer aux bandes que l'on rencontre si souvent dans les latitudes élevées. D'autre part, Herschel assigne à ces courants un autre rôle; les alizés ou plutôt, en adoptant la correction d'Arago, les *contre-alizés supérieurs* correspondants, entraîneraient « les taches ou nuages accidentels » avec des vitesses variables, d'où les différences des durées de rotation.

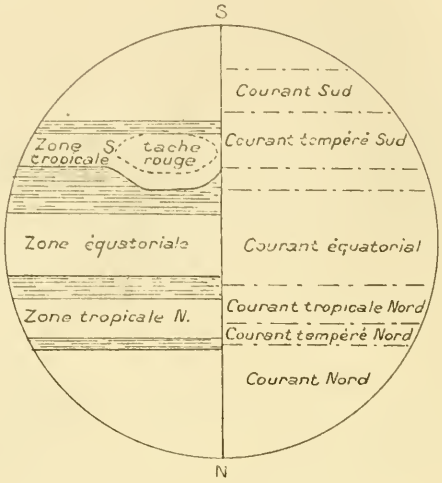
Mais ce sont là de simples analogies sans précision : avant d'adopter ce mode d'explication, il convient de déduire de l'ensemble des faits connus les conditions dans lesquelles se produiraient ces courants joviens.

Courants joviens. Belopolsky. Stanley Williams. — Dans ce but, un astronome anglais, Stanley Williams, reprenant pour le compléter un travail de Belopolsky, a classé par latitudes toutes les durées de rotation de taches brillantes ou sombres obtenues jusqu'en 1895 par les divers observateurs. Leur discussion lui a permis de démontrer l'existence de zones bien définies où la durée de rotation est sensiblement constante, zones qui correspondraient d'après lui à une série de courants permanents de dimensions et de position apparente fort peu variables, circulant autour de Jupiter les uns à côté des autres avec des vitesses différentes; Williams en distingue 8, dont les données sont réunies dans le Tableau suivant :

Zones.	Latitudes extrêmes.	Latitudes adoptées.	Durée de rotation.	Vitesse linéaire en kilomètres et à la seconde.
	° °	°	h m s	
I.....	+85 à +28	+48	9.55.37,5	8,3
II.....	+28 à +24	+26	56.30	11,1
III.....	+24 à +20	+22	48.45	11,6
IV.....	+20 à +10	+15	55.34	12,0
V.....	+10 à —12	0	50.20	12,5
VI.....	—12 à —28	—18	55.40	11,8
VII.....	—18 à —37	—27	55.18	11,0
VIII.....	—37 à —55	—46	55. 5	8,6

Williams a traduit ces résultats dans le dessin ci-joint (*fig.* 60) qui renferme les six principaux courants avec les noms que cet astronome leur a donnés.

Fig. 60.



Courant temporaire. — La zone III demande une mention spéciale; elle ne semble pas avoir la permanence des autres et n'a été indiquée à part que pour signaler les deux éruptions de nombreuses taches sombres, à durée de rotation particulière, qu'on a constatées en 1880 et en 1890, sur le bord sud de la bande tempérée nord, tout près de la zone équatoriale et presque symétriquement à la grande tache rouge : les durées individuelles de rotation de ces taches diffèrent entre certaines limites; mais en 1880 la rotation moyenne parut être de $9^h 48^m$ et en 1891 de $9^h 49^m, 5$.

A l'opposition de 1892 le nombre et la grandeur des taches avaient diminué sans que la rotation fût changée; en 1893 on n'en signala plus.

Ces taches et, par suite, le courant qui les transporterait semblent donc n'avoir qu'une certaine permanence : est-il réellement temporaire, ou au contraire est-il constant comme les autres? Il serait fort important de résoudre cette question. En tout cas, il faut remarquer l'énorme vitesse relative (439^m à la seconde) de ce courant et des deux entre lesquels il semble compris.

Discussion de ces hypothèses. — Le Tableau qui précède, au lieu de nous présenter, comme on pourrait s'y attendre, les durées de rotation rangées dans un ordre graduel, depuis la plus courte, celle du grand courant équatorial, jusqu'à la plus longue, ne nous donne en réalité que deux périodes : la *courte* et la *longue,* différentes entre elles de 5 minutes, soit le $\frac{1}{120}$ de la rotation totale. De plus, il n'y a, au point de vue de la distribution de ces zones et, par suite, de ces courants, aucune symétrie entre les deux hémisphères de la planète.

D'un autre côté, la vitesse linéaire relative des taches à courte période par rapport à celle des taches à longue période est d'environ 110^{m} *à la seconde,* infiniment supérieure à celle de nos alizés, alors que l'action calorifique du Soleil, qui est sur notre globe la cause de leur production, est certainement plus de cent fois moindre à la surface de Jupiter.

De même, comment comprendre la production, la persistance temporaire et la disparition rapide de courants aussi violents que ceux de la zone III sans que, pendant cette immense perturbation, l'aspect des zones contiguës ait sensiblement changé? L'hypothèse du grand Herschel semble donc bien difficile à admettre.

Taches diverses. Explication de Hough. — Quant aux détails qu'offrent les rotations des taches, Hough en donne une explication qui paraît satisfaisante.

Les différences de vitesses constatées dans la rotation des taches de Jupiter seraient dues à des différences de niveau, par rapport à la surface de la planète, des masses flottantes qui les forment, les taches à rotation lente étant les plus profondes et les rapides étant les plus élevées; puisque toutes nous apparaissent sur la même surface, ces dernières semblent avoir, dans le même temps, parcouru un arc plus grand.

En outre, un enfoncement ou un relèvement périodique expliquerait l'apparition périodique des taches, ainsi que les variations de leur éclat et de leurs durées de rotation.

Conclusion. — Quoi qu'il en soit, la partie superficielle de Jupiter, dans laquelle se produisent les bandes et les taches, paraît donc avoir une constitution bien différente de celles des planètes plus voisines du

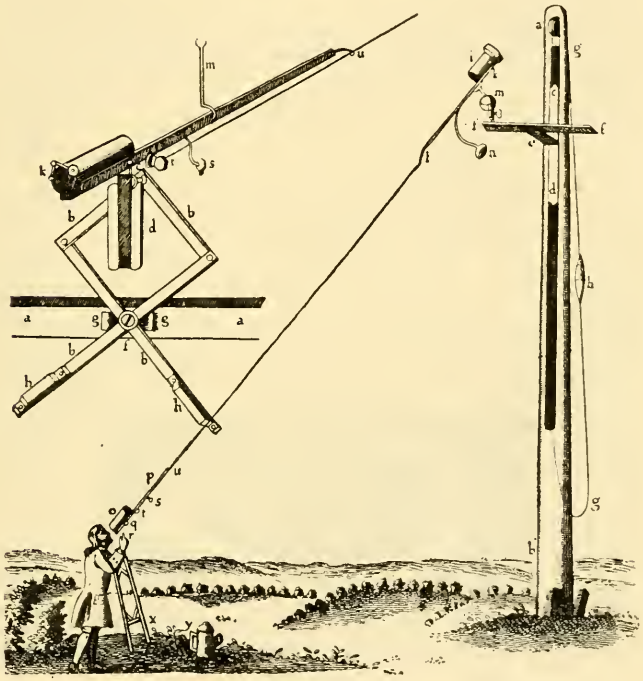
Soleil; et même il semblerait que l'on puisse voir dans les grandes masses flottantes qui forment et la grande tache rouge et, tout au moins, les taches brillantes, comme les noyaux de satellites qui n'auraient pu se séparer de la planète; tout aussi bien ne peut-on pas considérer les bandes équatoriales comme une tentative de formation d'un anneau analogue à celui de Saturne, Jupiter nous montrant alors un modèle de ce qu'a pu être cette curieuse planète à un certain stade de son évolution?

CHAPITRE V.

SATURNE.

Saturne se différencie plus encore que Jupiter des quatre planètes les plus voisines du Soleil, et forme dans le système solaire comme un objet à part. En effet, et c'est Huygens qui l'a démontré (la figure 61

Fig. 61.



Instrument d'Huygens.

donne le dessin de l'instrument d'Huygens et à gauche le détail du porte-oculaire), Saturne ne se compose pas, comme les autres, d'un globe qu'accompagnent de loin des satellites; mais, pour lui, ce globe

est placé (*fig.* 62) au centre d'un anneau mince, concentrique, qui l'entoure complètement sans le toucher, dont le plan se confond sensiblement avec celui de son équateur et que la planète transporte parallèlement à lui-même dans sa révolution autour du Soleil.

Fig. 62.

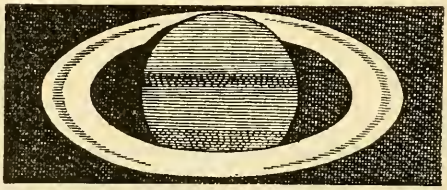
Huygens.

Depuis Huygens, le perfectionnement continu des lunettes astronomiques et l'accroissement successif de leur puissance ont précisé et détaillé les notions qu'il avait posées, sans en altérer les données fondamentales.

II. — Étude physique de Saturne.

Globe. — Comme J.-D. Cassini l'a démontré le premier l'ombre portée par le globe central sur l'anneau est *noire* (*fig.* 63); ce globe

Fig. 63.

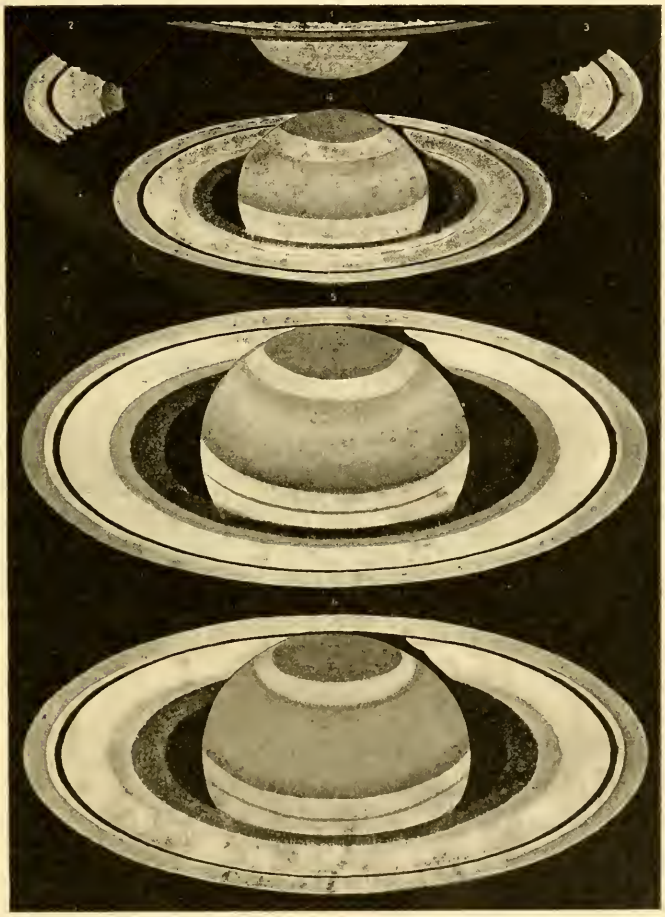


Cassini.

n'est donc pas lumineux par lui-même, la lumière qu'il nous envoie provient du Soleil. Comme celui de Jupiter, le globe de Saturne est aplati, et son équateur est dirigé dans le plan de l'anneau. La zone équatoriale en est de beaucoup la partie la plus brillante (*fig.* 64); elle est d'une teinte jaunâtre uniforme, symétrique par rapport à

l'équateur et d'une largeur de 20° de latitude saturnienne. De chaque côté de cette zone, on voit quelques bandes plutôt sombres, mais floues sur les bords, séparées par des intervalles plus lumineux;

Fig. 64.



La planète Saturne.

viennent ensuite les régions polaires qui forment comme deux calottes beaucoup plus sombres. D'ailleurs, le nombre, la situation et les dimensions de ces bandes, bien moins nettes que celles de

Jupiter et un peu incurvées par suite de l'inclinaison de leur plan sur l'écliptique, sont très variables; si bien, que l'aspect du globe, sauf pour la zone brillante équatoriale, change pour ainsi dire constamment. Cet ensemble de faits porte à admettre que la surface du globe de Saturne est formée par une masse très mobile et probablement de nature gazeuse : cette planète serait donc entourée d'une atmosphère assez dense.

Les observations spectroscopiques de Secchi et Vogel ont nettement confirmé l'existence de cette atmosphère; le spectre de Saturne présente, en effet, la plus grande analogie avec celui de Jupiter; de même l'albedo (0,841) de Saturne est avec celui de Vénus le plus grand de toutes les planètes.

Rotation. — Ainsi que W. Herschel l'a reconnu le premier (1793) au moyen des irrégularités que présentaient certaines bandes sombres de Saturne, cette planète tourne sur elle-même; d'après lui cette rotation s'effectuerait en environ 10 heures 16 minutes, autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'anneau. Il s'écoula presque un siècle avant que cette détermination fut reprise; l'étude attentive de Saturne avec des instruments puissants décela alors, sur les parties médianes de son disque, un certain nombre de petites taches très nettes, soit brillantes, soit obscures, plus ou moins durables, à l'aide desquelles Asaph Hall en 1876 et A.-S. Williams à partir de 1891 ont étudié sa rotation. Il résulte de leurs recherches qu'à l'équateur même (entre -6° et -2°) la durée de la rotation est en moyenne de $10^h\,12^m\,53^s$, tandis qu'elle est de $10^h\,14^m\,45^s$ entre les latitudes de 17° et de 37°.

La rotation de la surface de Saturne serait donc plus rapide à l'équateur qu'un peu plus près du pôle nord; en outre, la durée de la rotation diminuerait avec le temps; de 1891 à 1894, cette diminution serait de 1 minute 46 secondes, correspondant à un accroissement de vitesse linéaire d'environ 100^{km} par heure (soit 29^m par seconde). On trouve donc dans l'atmosphère de Saturne les mêmes phénomènes que dans celle de Jupiter; ils s'expliqueraient de la même manière. En 1903, une tache brillante (latitude $+36^\circ$) découverte par Barnard à l'Observatoire Yerkes lui fournit ainsi qu'à quelques autres astronomes, l'occasion d'une détermination nouvelle de cette rotation : on en conclut la valeur $10^h\,38^m\,5^s$, bien différente des précédentes.

III. — Anneaux de Saturne.

Division de Cassini. — L'étude de l'anneau d'Huygens est des plus intéressantes; en réalité, c'est anneaux qu'il faut dire, car, nombre d'astronomes en ont reconnu depuis la multiplicité. C'est d'abord J.-D. Cassini qui, en 1675, trouve la division, dite *raie de Cassini* (*fig.* 65), qui partage la surface de l'anneau en deux zones

Fig. 65.

Aspect de la planète Saturne (4 mars 1884).

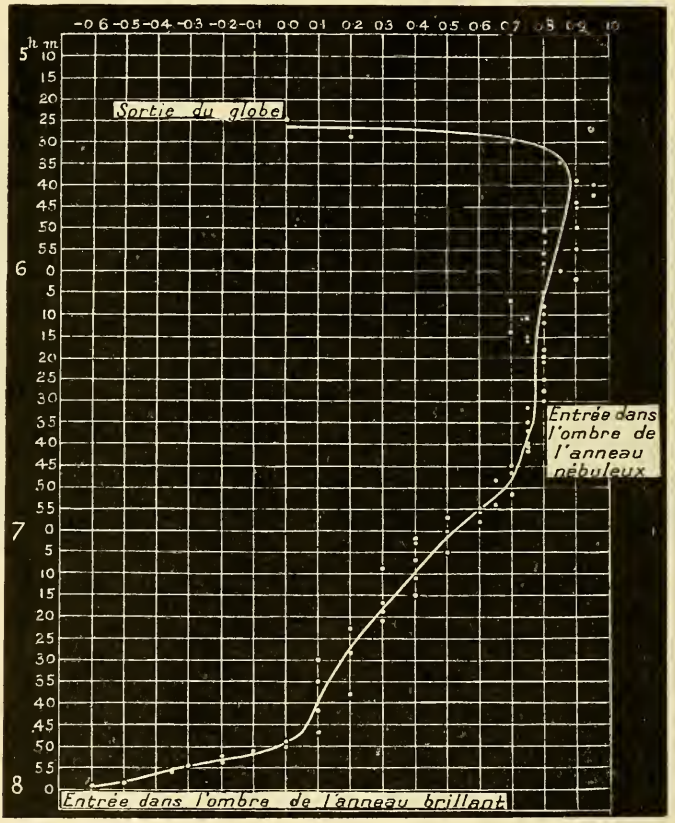
d'inégal éclat, l'une intérieure (B) plus vive, l'autre (A) extérieure moins brillante. Cette division n'est pas d'ailleurs que superficielle; mais, comme l'ont constaté Maraldi et W. Herschel, elle indique une séparation de l'anneau en deux anneaux distincts, si bien que lorsque les circonstances sont favorables, on peut apercevoir à travers elle le globe même de la planète ([1]).

Dans ces deux zones, mais surtout sur la zone B, on a remarqué souvent d'autres divisions ou raies, parfois très fines, parfois plus faciles à distinguer comme celle signalée par Encke en 1838.

([1]) Lassell en 1852, Young et Hall en 1883, Withsnell et Toushend en 1902 l'ont constaté.

Anneau de Bond. — Au milieu du siècle dernier (10 octobre 1850), Bond constatait à l'observatoire d'Harvard College, l'existence d'un troisième anneau (C) intérieur à celui d'Huygens et s'en distinguant par son aspect sombre, sa couleur bleu d'acier contrastant peu avec le fond du ciel, ce qui l'avait jusqu'alors dérobé aux observateurs, et

Fig. 66.



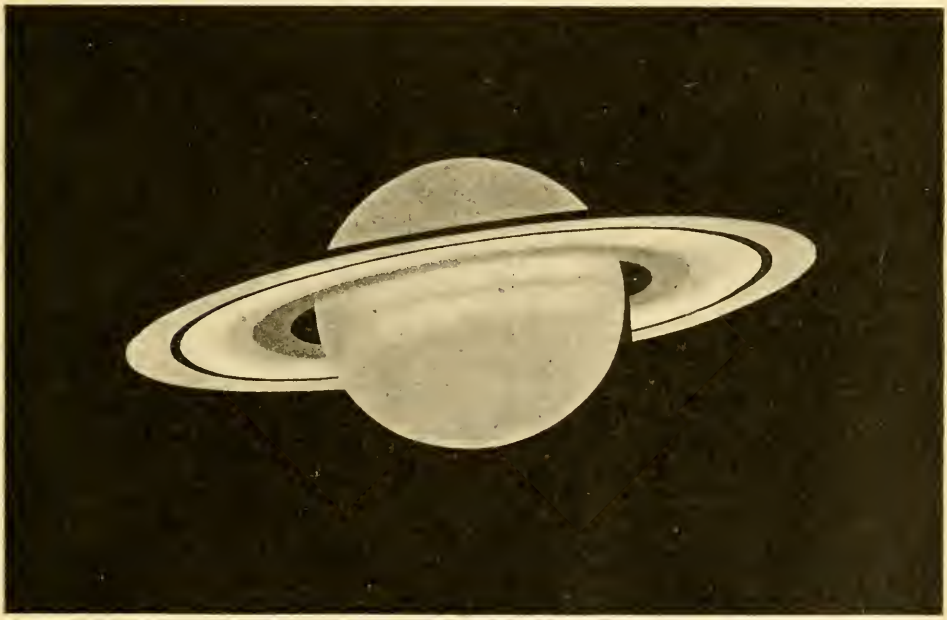
Éclipse de Japet, le 1er novembre 1889.

qu'on appelle l'*anneau nébuleux*. Le bord extérieur de cet anneau semble continuer le bord intérieur de (B) et il n'y a aucune trace de séparation entre eux deux. Il semble seulement qu'au voisinage de cet anneau nébuleux, l'anneau brillant est moins bien défini, en sorte

que le premier semble un prolongement du second, comme s'il y avait eu diffusion de sa matière, et comme si le premier s'était formé aux dépens de l'anneau brillant.

Observation de Barnard. L'anneau de Bond est transparent. — Mais, fait très important, tandis que les anneaux lumineux constituent un milieu *opaque*, puisqu'ils projettent sur le globe de la planète des ombres parfaitement noires; l'anneau nébuleux est, au contraire, *transparent* dans presque toute sa largeur. En effet, on distingue très nettement à travers lui les limites du globe de la planète; et de plus, ainsi que l'a montré Barnard avec le grand objectif de l'observatoire Lick, lorsque l'un des satellites, Japet par exemple, vient à passer dans l'ombre portée par l'ensemble de la planète et de ses

Fig. 67.



anneaux, ce satellite devient visible dès qu'il quitte l'ombre du globe, et le reste jusque tout près du moment où il entre dans l'ombre de l'anneau brillant; son éclat (*fig.* 66) maximum au moment où il quitte l'ombre, diminue d'abord très lentement si bien qu'il est sensi-

blement constant pendant 1 heure 10 minutes environ, après quoi à partir de l'entrée dans l'ombre de l'anneau nébuleux, il reste encore visible pendant environ 55 minutes, mais avec une diminution régulière et progressive de son éclat, jusqu'à ce que, entré décidément dans l'ombre de l'anneau lumineux, il devienne invisible.

L'ensemble de ces faits prouve bien que la lumière du Soleil, qui seule éclaire le satellite, peut passer à travers l'anneau nébuleux, mais qu'elle est arrêtée par les autres anneaux lumineux.

En résumé, l'anneau d'Huygens, d'aspect très complexe (*fig.* 67), comporte trois anneaux principaux, dont le médian est de beaucoup le plus lumineux, et chose assez intéressante dont les centres ne sont pas superposés à celui de la planète, l'espace oriental entre celle-ci et le bord interne de l'anneau médian, par exemple, étant de $0'',21$ ($11\,000^{km}$) plus grand que l'espace occidental [1].

Forme irrégulière de l'ombre des anneaux. — Un autre fait important est le suivant : quelques observateurs ont constaté que l'ombre projetée par le globe sur les anneaux avait rarement, vers la division de Cassini, la forme régulière, concave vers le bord de la planète, qu'elle devrait avoir si la surface extérieure de ces anneaux était plane : elle est, la plupart du temps (*fig.* 64), assez irrégulière

---

[1] Voici, d'après O. Struve, les dimensions rapportées au demi-diamètre équatorial de la planète et aussi en kilomètres, des différentes portions de l'anneau de Saturne.

		En rayon du globe.	En kilomètres.
A.	Demi-diamètre extérieur	2,229	139 200
	» intérieur	1,962	123 200
	Largeur	0,267	16 000
B.	Demi-diamètre extérieur	1,916	119 770
	» intérieur	1,482	87 740
	Largeur	0,434	32 030
C.	Demi-diamètre intérieur	1,208	73 625
	Largeur	0,274	14 115
Largeur de la division de Cassini		0,073	3 430
Demi-diamètre équatorial de Saturne			61 000
» polaire »			54 400

A titre de coïncidence remarquable, nous constaterons que la somme des largeurs de ces différents anneaux est égale au demi-diamètre de la planète.

Ajoutons que Kirkwood a fait remarquer que les vides de l'anneau de Saturne correspondent à des régions où le moyen mouvement d'un satellite serait le double du premier ou du second satellite.

et bien souvent formée de deux courbes concaves unies par leur extrémité intérieure et faisant là un angle très marqué, paraissant indiquer ainsi des différences de niveau considérables dans la surface qui limite les anneaux. Une inspection attentive, celle des anses en particulier, montre également que ces anneaux sont loin d'être symétriques par rapport au centre du globe; d'autre part, les éclats relatifs des anneaux lumineux ne paraissent pas les mêmes à différentes époques; de même aussi la zone interne de l'anneau B qui touche à C est parfois très foncée, parfois se distingue à peine. De son côté l'anneau C est parfois très facilement visible vers l'Est, tandis qu'on le distingue difficilement à l'Ouest; tantôt c'est l'opposé qui a lieu.

Enfin, les raies de division des anneaux lumineux se déplacent à leur surface, tantôt se rapprochant, tantôt s'éloignant de la division cassinienne; elles sont très irrégulièrement visibles, parfois même la raie d'Encke, la plus nette d'entre elles, disparaît complètement dans les plus grands instruments. Ces raies ne paraissent donc pas marquer, comme celles de Cassini, un vide dans l'anneau; mais comme elles se voient aussi bien sur sa face sud que sur sa face nord, elles paraissent indiquer des diminutions locales de densité de cet anneau et comme une série d'amincissements dans son épaisseur.

Constitution des anneaux de Saturne. — Quelle est donc la constitution de ces anneaux? Les travaux successifs de Roche (1849), Maxwell (1857) et Hirn (1872) nous l'ont fait connaître dans ses grandes lignes.

Des anneaux gazeux ou même liquides se rapprocheraient lentement de la planète dans toutes les directions et finiraient par se confondre avec elle; des anneaux solides et tout d'une pièce, à moins d'être infiniment résistants et inflexibles, ne dureraient que très peu et arriveraient très rapidement à une désagrégation complète.

Les anneaux de Saturne sont donc constitués par des particules matérielles, solides, discontinues, séparées par des intervalles très grands relativement à leurs dimensions ([1]).

([1]) Cette idée avait été émise, mais comme simple hypothèse, par J.-D. Cassini en 1705. « Cet anneau, dit-il, pourrait être formé d'un essaim de petits satellites qui pourraient faire à Saturne une apparence analogue à celle que la voie lactée fait à la Terre par une infinité de petites étoiles dont elle est formée. »

Ces corpuscules, ou petits satellites, sont distribués en une série d'essaims annulaires distants les uns des autres et dans lesquels chacun d'eux décrit, autour de Saturne comme foyer et dans des plans peu inclinés les uns sur les autres, une ellipse de forme et de dimensions déterminées, de sorte que si l'on pouvait, comme pour les astéroïdes, faire le dénombrement de tous ces corpuscules par grandeur croissante de leur moyen mouvement, on aurait, mais avec des variations bien plus considérables dans les nombres successifs, c'est-à-dire avec des lacunes beaucoup plus importantes, une série d'anneaux successifs et partiels, dont l'épaisseur irait en diminuant depuis son milieu jusqu'à chacun de ses bords et qui parfois deviendrait nulle dans un assez grand intervalle, dans la division de Cassini, par exemple.

On s'explique bien ainsi les variations continues et progressives de l'éclat dans chacun de ces anneaux partiels, puisqu'il dépend évidemment du nombre de corpuscules correspondant, pour ainsi dire, à chaque rayon visuel ; on comprend également bien les changements de position et d'intensité des raies noires qui forment les limites de chaque subdivision. En effet, leurs attractions réciproques, ainsi que celles des satellites, continûment variables en un point déterminé de l'anneau, amènent dans l'effet de l'action dominante de la planète un ensemble de perturbations faibles et périodiques qui fait varier périodiquement les dimensions de ces différents essaims, ainsi que leur densité à une distance déterminée de la planète. A un moment donné, les séparations entre deux essaims consécutifs nous apparaîtront être des raies noires, comme la raie d'Encke; mais, par suite des perturbations, ces raies se déplacent et de même aussi les éclats relatifs des différentes parties qu'elles comprennent changent avec la densité correspondante, et la périodicité même de ces changements assure la stabilité du système.

Il y a plus, chacune de ces particules est certainement animée d'un mouvement de rotation axiale, dont l'axe n'a pas nécessairement la même direction pour toutes : il en résulte évidemment une nouvelle cause périodique de changement dans l'aspect physique des anneaux.

Preuve spectroscopique. — D'autre part, ce mode de constitution étant admis, il n'y a plus à proprement parler de rotation de l'anneau, chacun des éléments qui le composent effectuant isolément sa

révolution autour du globe. Mais la vitesse linéaire suivant la ligne de visée doit être évidemment plus grande à sa limite intérieure qu'à sa limite extérieure et la constatation de ce fait serait une preuve décisive. Elle a été faite, en 1895, avec le spectroscope par trois

Fig. 68.

3/23 mars 1892. 4/15 avril 1892.

Saturne, sans anneaux (dessin de Guillaume).

observateurs différents, Keeler, Deslandres et Belopolsky; comme moyenne de leurs résultats d'ailleurs très concordants, on a, en effet :

Vitesse du bord intérieur.....	$20^{km},7$
» » extérieur.....	$16^{km},0$

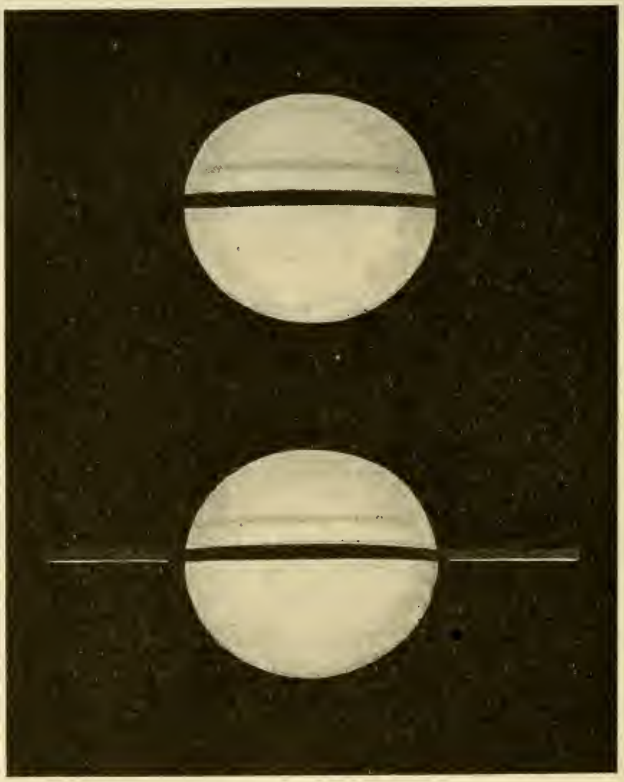
Belopolsky ajoute que la radiation de l'anneau serait plus riche en lumière violette que celle de la planète, constatant ainsi pour lui une composition superficielle toute différente de celle-ci.

Cette constitution rend bien compte d'un certain nombre de particularités notées à diverses époques.

Non-coïncidence des centres des anneaux et de la planète. — Ce qui nous apparaît comme les anneaux de Saturne n'étant que la somme d'une multitude de points lumineux distincts décrivant autour de la planète des courbes différentes, la forme apparente des anneaux n'est autre chose que la forme moyenne de tout cet ensemble d'orbites elliptiques et par suite elle doit être une ellipse ayant Saturne pour foyer. Les anneaux ne peuvent donc pas être centrés sur la planète et ainsi s'explique de soi-même la non-superposition des centres constatée par Struve.

Saturne sans anneaux. Particularités relatives aux anses. — On sait que par suite de l'inclinaison (28°) des anneaux sur l'écliptique, les parties de ceux-ci éclairées par le Soleil sont vues de façons bien différentes par l'observateur, suivant les positions rela-

Fig. 69.



Saturne, sans anneaux.

tives de Saturne et de la Terre ; tantôt nous en voyons la face nord, tantôt la face sud (*fig.* 68) ; aux époques de ces interversions ils disparaissent même, et Saturne paraît sans anneaux (*fig.* 69). C'est qu'alors leur plan moyen passe par le Soleil ou par la Terre et qu'ils ne se montrent plus à nous que par la mince ligne sombre que leur ombre détermine sur le globe de la planète, et par la ligne très peu

lumineuse que peut produire à son extérieur leur tranche mince éclairée [1].

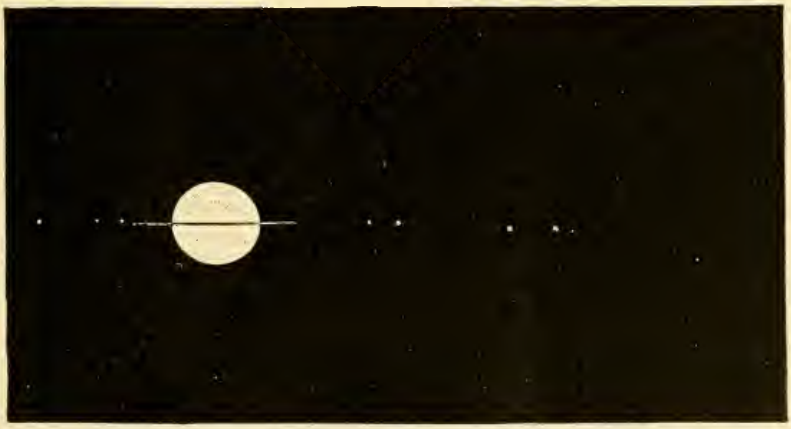
Dans la majeure partie des disparitions ou des réapparitions d'anneaux qui accompagnent ces époques, les deux anses n'ont jamais disparu ni réapparu en même temps; les surfaces terminales de l'anneau ne sont donc pas des plans parallèles, ce sont certainement des surfaces courbes; d'autre part, dans celle des anses qui disparaît la dernière, beaucoup d'observateurs ont signalé l'apparence de petites perles brillantes, indiquant pour l'anneau une surface limite ondulée offrant une série de bosses et de creux successifs. Ces deux ordres de faits sont des conséquences immédiates de la constitution que nous avons adoptée pour les anneaux.

Anomalie dans la rotation des anneaux de Saturne, W. Herschel, Deslandres. — Herschel est le premier qui ait cherché (1790) à déterminer la rotation des anneaux de Saturne. D'après lui, les nodosités lumineuses, que l'on aperçoit sur la tranche des anneaux

---

[1] Ces apparences qui se renouvellent tous les quinze ans et durent environ une année, sont d'autant plus intéressantes qu'alors les sept premiers satellites se répar-

Fig. 70.



Saturne, sans anneaux et ses satellites anciens.

tissent sur le prolongement de cette ligne (*fig.* 70), comme des grains de chapelet brillants et mobiles, montrant ainsi, sans qu'il soit besoin d'aucune mesure, la coïncidence des plans de leurs orbites avec le plan moyen des anneaux.

lorsque leur plan passe par la Terre ou le Soleil, se déplaceraient le long de cette tranche, et ces déplacements peuvent servir de base à la mesure de la rotation. Il trouva ainsi la valeur

$$10^h 32^m.$$

En admettant la réalité de ces déplacements [contestés par Schræter et Harding (1806) et niés par W. C. Bond (1848)], il reste néanmoins une indécision profonde sur la position. au sein des anneaux, des nodosités observées. Cherchons à l'apprécier, les astricules dont l'ensemble constitue les anneaux se mouvant autour de la planète, suivant les lois de Képler, nous pouvons en partant des distances observées des bords extrêmes des anneaux au centre de la planète et de la distance et du temps de révolution d'un des satellites, Mimas, par exemple, calculer les temps de révolution qui doivent correspondre à chacun de ces bords. On obtient ainsi :

	Bord extérieur.	Bord intérieur.
Anneau A.....	$13^h 8$	$11^h 4$
Anneau B.....	11,0	7,5
Anneau C..... ..	»	5,4

Il est intéressant de comparer les résultats du calcul à ceux que donne l'observation spectroscopique et que voici :

Anneau A (bord extérieur).....	$15^h 1^m$
Anneau B (bord intérieur).....	7,7

Ces nombres, plus concordants qu'on ne l'aurait espéré *a priori*, montrent que la portion des anneaux qui ont attiré l'attention d'Herschel est voisine du milieu de l'anneau B. Mais les nombres précédents comportent en outre un enseignement très inattendu.

La durée de la rotation axiale de Saturne étant de $10^h 3^m$, il en résulte que dans une portion de l'anneau B et dans tout l'anneau C les astricules élémentaires effectuent leurs révolutions autour de la planète en un temps moindre que cette rotation axiale.

Le système de Mars nous a présenté une anomalie analogue dans son premier satellite; mais il s'agissait alors d'un corps isolé circulant autour de la planète; pour Saturne le partage d'un même anneau (B) en deux portions dont les astricules n'obéiraient point, en apparence, aux mêmes lois, semble un fait bien extraordinaire et plus remarquable encore que le premier.

CHAPITRE VI.

URANUS.

Astre nouveau dans les Gémeaux. — Le 13 mars 1781, en examinant les petites étoiles voisines de H des Gémeaux, avec son télescope de $2^m,13$ de foyer et un grossissement de 227, W. Herschel remarqua une étoile de 6e à 7e grandeur dont l'aspect lui parut différer beaucoup des voisines, surtout par un diamètre absolument inusité.

Augmentant progressivement le grossissement (460 et 932 fois), il vit ce diamètre croître en proportion, et beaucoup plus rapidement que ne le fait le *faux disque* (1) d'une étoile; de plus, au delà d'une certaine limite de grossissement, le disque du nouvel astre devenait très faible et mal terminé, tandis qu'alors les étoiles voisines avaient conservé leur netteté. Cet astre n'était donc point une étoile. Un micromètre de sa construction lui permit de comparer les jours suivants sa position à celle des étoiles voisines et bientôt son déplacement relatif, quoique lent, lui devint évident.

Nature de cet astre. Herschel le prend pour une comète. — Qu'était cet astre mobile ? De toute antiquité, on voyait le Soleil entouré de six planètes; depuis près de deux cents ans que l'on scrutait le ciel avec des lunettes et malgré les nombreuses découvertes qu'elles avaient amenées, rien n'avait même pu faire soupçonner que ce cortège pût être modifié. Au contraire, la vogue était alors aux comètes; Messier en découvrait au moins une par an; bien peu d'entre elles avaient chevelure ou queue, parfois leur aspect ne différait pas sensiblement d'un disque lumineux, et souvent leur éclat était moindre que celui du nouvel astre.

(1) Herschel appelle ainsi la tache lumineuse centrale de l'image d'une étoile au foyer d'une lunette. On sait que cette tache de diamètre apparent déterminé par le diamètre de l'objectif est entourée d'une série d'anneaux brillants. (*Voir* Ch. André, *De la diffraction dans les instruments d'optique*, Gauthier-Villars.)

Aussi Herschel, débutant alors [1] dans la carrière qu'il devait parcourir avec tant d'éclat et obéissant au courant général, vit-il dans l'astre une comète nouvelle; c'est sous cette forme qu'il annonça sa découverte à Maskelyne, alors Astronome royal d'Angleterre, et par lui aux astronomes du continent.

Invraisemblance de cette assertion. De Saron. — Mais bientôt se montra l'invraisemblance d'une pareille nature; si cet astre était une comète, il aurait été, comme tous les autres, situé, lors de sa découverte, aux environs de sa plus courte distance au Soleil et à partir de là s'en serait éloigné très rapidement en suivant une parabole ou une ellipse très excentrique : d'après la loi des aires, sa distance angulaire au Soleil devait donc augmenter dans la même proportion, effet qui devait se traduire par un déplacement rapidement croissant sur le ciel étoilé. Or les observations nombreuses qui suivirent l'annonce de la découverte montraient, au contraire, que ce déplacement restait très lent et de vitesse sensiblement constante.

L'orbite de ce corps nouveau se rapprochait donc de la forme circulaire; et, en outre, ainsi que le démontra de Saron, sa distance au Soleil devait être au moins égale à 14 fois celle de la Terre au Soleil et par suite presque double de celle de Saturne, tandis que toutes les comètes connues avaient leur distance périhélie inférieure à celle de Jupiter. D'un autre côté, si cet astre était une comète analogue aux autres, son éclat devait diminuer rapidement et il devait bientôt être invisible; au contraire, l'observation poursuivie indiquait un éclat sensiblement constant, en même temps l'astre nouveau se montrait toujours sous la forme du même disque lumineux fort bien terminé comme ceux de Mars et de Jupiter.

C'est une planète nouvelle. Laplace. — Dès le mois d'août 1781 les savants calculs de Laplace avaient démontré que *cette comète rebelle, sans queue et sans chevelure,* était en réalité une planète nouvelle, circulant autour du *Soleil suivant les mêmes lois que les six premières.*

Le peu de temps écoulé depuis sa découverte ne permettait évidem-

---

[1] Le premier Mémoire du grand Herschel est de 1780; il se rapporte à l'étoile variable o de la Baleine.

ment pas une détermination bien exacte des éléments de son mouvement: mais cette détermination d'espèce, dans laquelle l'Astronomie française avait la plus grande part, n'en était pas moins un fait capital: elle reportait l'action du Soleil bien au delà des limites jusqu'alors admises; et, surtout, elle laissait le champ libre aux extensions ultérieures en faisant pressentir que cette acquisition pouvait ne pas être la dernière.

En même temps, elle fit connaître à toute l'Europe et à l'Angleterre elle-même le nom d'un homme qui, débutant à 40 ans environ dans les études astronomiques par une découverte capitale, devait plus tard mettre en pleine évidence la constitution de l'univers et mériter qu'Arago l'appelât l'un des plus grands astronomes de tous les temps et de tous les pays.

Observations d'Uranus antérieures à sa découverte. — Étant donné l'éclat de cette planète [1], il était probable qu'en d'assez nombreuses occasions les astronomes l'avaient, dans leurs dénombrements stellaires, vue et notée comme une étoile, plus tard disparue de cet endroit de la sphère céleste. Les positions ainsi obtenues acquéraient une importance d'autant plus considérable que le temps écoulé entre elles était plus grand. Ces recherches furent possibles dès que, les éléments de l'orbite étant connus, on put retrouver la route que la planète avait suivie dans le ciel: elles conduisirent à la constatation qu'en effet on en possédait un assez grand nombre, dont voici la liste :

1690, septembre 23; de Flamsteed (signalée par Bode en 1787).
1712, mars 22; de Flamsteed } (signalées par Burckhard en 1818).
1715, » 4, 5, 10, de Flamsteed }
1748, octobre 21; de Bradley (signalée par Brenn en 1864).
1750, octobre 14 et décembre 3: de Le Monnier (signalées par Bouvard en 1820).
1756, septembre 25; de Tobie Mayer (signalée par Bode en 1787).
1768, décembre 20 et 30; de Le Monnier (signalées par Bouvard en 1820).
1769, janvier 15, 16, 20, 21, 23; de Le Monnier (signalées par Bouvard en 1820).

---

[1] Uranus a par moments l'état d'une étoile de 6e à 6e,5 grandeur; de sorte que lorsque l'on connaît la position qu'elle doit occuper sur la voûte céleste, on peut l'apercevoir à l'œil nu; tels Heis en 1848 et Schmidt en 1874.

Cet ensemble d'au moins 15 positions de la planète, distinctes et les unes très espacées, permet évidemment à lui seul de déterminer son orbite pour ainsi dire préhistorique, c'est-à-dire avant la découverte de sa nature réelle : c'est, on le verra bientôt, une donnée capitale.

En outre, il est bon de remarquer qu'à l'époque de Le Monnier la précision des observations était bien suffisante pour que, s'il eût réduit de suite ses 5 observations de 1769, il eût immédiatement constaté le déplacement de cette étoile sur la sphère et par suite eu, deux ans avant Herschel, la gloire de la découverte de la planète Uranus.

Figure de la planète; sa rotation. Herschel, Brenner. — Le grand Herschel s'est à plusieurs reprises occupé de la forme de cette planète; et, quoiqu'il ne paraisse point avoir fait de mesures micrométriques, une observation du 5 mars 1792 avec un miroir de 20 pieds de foyer et des grossissements allant de 140 à 1200 l'ont absolument convaincu que le disque de la planète n'était pas circulaire : Uranus est donc, comme les anciennes planètes, un ellipsoïde de révolution. Herschel en conclut sans hésiter que cette planète tourne sur elle-même avec une grande vitesse.

Ce n'est que tout récemment que cette induction a été confirmée directement; et cette confirmation on la doit à M. Léo Brenner qui, pendant le courant des mois de mai et juin 1896, suivit assidûment la planète avec l'équatorial de $0^m,19$ de l'observatoire Manora.

L'étude attentive des taches dont, après Schiaparelli (1883), il constata la présence sur le disque d'Uranus, le conduisit à cette conclusion que la planète tourne sur elle-même en environ $8^h 15^m$; mais, chose qui eût bien surpris le grand Herschel, la rotation de cette planète sur elle-même se fait en sens opposé à celui dans lequel tournent toutes les planètes précédentes. Ce fait, très important au point de vue cosmogonique, a été confirmé en 1901 par M. Deslandres, au moyen du spectrophotographe.

Quant aux mesures micrométriques faites par cet astronome, sur les taches d'Uranus « les plus faibles qu'il ait vues sur les planètes », en vue de déterminer l'axe de rotation, les résultats en sont trop incertains pour qu'il n'y ait pas lieu d'attendre les conclusions d'une étude ultérieure, étude que M. Brenner n'a pu entreprendre depuis.

CHAPITRE VII.

NEPTUNE.

I. — Irrégularités du mouvement d'Uranus.

Tables de Bouvard. Irrégularités du mouvement d'Uranus. — Avant que nous eût été révélée l'exception singulière que nous venons de signaler, relativement au sens de son mouvement de rotation, la planète Uranus nous avait causé une bien autre surprise, et voici comment :

Au commencement du XIXe siècle, l'astronome Alexis Bouvard, alors chargé de la rédaction de la *Connaissance des Temps,* entreprit de construire des Tables d'Uranus permettant d'établir sa position sur le ciel à un instant quelconque et, par suite, la publication d'éphémérides facilitant son observation continue et la mettant pour ainsi dire au point avec les autres planètes. Or, il se heurta à une difficulté inattendue, qu'il signala en 1821. Il trouva que les observations anciennes, depuis Flamsteed jusqu'à la découverte (1781) et celles qui avaient été effectuées peu de temps après elle, c'est-à-dire les observations comprises dans l'intervalle d'environ un siècle, pouvaient être représentées avec beaucoup d'exactitude en donnant à Uranus une certaine orbite elliptique autour du Soleil; mais ce fut en vain qu'il tenta de renfermer dans la même orbite les observations plus récentes; si, au contraire, on rejette les premières pour ne conserver que les autres, il en résultera des Tables qui auront toute l'exactitude désirable relativement aux observations modernes, mais qui ne pourront satisfaire convenablement aux observations anciennes. Entre ces deux partis « j'ai dû m'en tenir au second, comme étant celui qui réunit le plus de probabilités en faveur de la vérité, et je laisse aux temps à venir le soin de faire connaître si la difficulté de concilier les deux systèmes tient à l'inexactitude des observations

anciennes, ou si elle dépend de quelque action étrangère et inaperçue qui aurait influencé la marche de la planète. »

Ces irrégularités pourraient servir au calcul de l'orbite d'une planète inconnue. — Les Tables de Bouvard eurent donc pour base es observations faites de 1783 à 1820; selon toute vraisemblance, elles devaient s'accorder longtemps avec les observations. Mais il n'en fut pas ainsi; dès 1830 les différences atteignaient 20″. Il devenait donc évident qu'une action étrangère et inaperçue devait troubler le mouvement de la planète : ce fut alors l'opinion générale. Dès 1829, A. Bouvard concluait à la nécessité de construire de nouvelles Tables d'Uranus, mais occupé alors par la reconstruction de celles de Jupiter et de Saturne, il en confiait, en 1834, le soin à son neveu Eugène Bouvard, et lui manifestait l'espérance « qu'en retournant le problème ordinaire des perturbations, qui consiste à déterminer leur grandeur d'après la connaissance des mouvements des astres troublants, on pourrait conclure les éléments de l'orbite du principal d'entre eux d'après les valeurs observées des différences existant entre les positions réelles d'Uranus et les positions assignées en ne tenant compte que de l'action de Jupiter et de Saturne ».

Les Tables d'Eugène Bouvard furent terminées dans l'été de 1845 (elles furent présentées à l'Institut en septembre 1845) et non publiées d'ailleurs. Fondées sur toutes les observations connues à cette époque, elles représentaient mieux que les anciennes le mouvement actuel d'Uranus, mais les différences restantes étaient encore trop grandes pour pouvoir être attribuées aux erreurs d'observation, et confirmèrent, dit E. Bouvard, l'idée de son oncle sur l'existence d'une planète perturbatrice. C'est la seule allusion au problème inverse si bien posé par A. Bouvard et dont la solution devenait de jour en jour plus nécessaire.

Arago et Le Verrier. — Or, le Bureau des Longitudes, alors présidé par l'illustre Arago, venait de s'attacher à titre d'adjoint un jeune ingénieur de l'Administration des tabacs qui, après y avoir marqué son passage par la découverte des phosphures liquide et solide d'hydrogène, s'était lancé dans l'étude de la Mécanique céleste et avait présenté en 1839 et 1840 à l'Académie des Sciences deux Mémoires très importants *Sur les variations séculaires des éléments des orbites*

pour les sept planètes principales et *Sur la détermination des inégalités séculaires des planètes*, Mémoires dans lesquels, après avoir perfectionné et complété les belles méthodes de Laplace, il donne les éléments des orbites des quatre premières planètes de 1000 en 1000 ans pour un intervalle de 100000 ans avant et après l'année 1800. Le Verrier était alors bien certainement l'homme de France le plus capable de mener rapidement à bien la question qui tenait les astronomes en éveil, à savoir de trouver les lois auxquelles était soumis l'astre d'Herschel, devenu avec le temps *une planète rebelle*.

Aussi Arago l'y engagea-t-il très vivement dans l'été de 1845, en lui représentant que « l'importance de la question imposait à chaque astronome le devoir de concourir autant qu'il était en lui à l'éclaircir ». Telle est l'origine du plus célèbre des travaux, si nombreux et si importants, de Le Verrier; et, voici comment cet astronome énonce lui-même le problème à résoudre.

Énoncé du problème par Le Verrier. — « Vingt-cinq ans écoulés depuis la publication des Tables d'Uranus, nous ont appris que ces Tables, qui ne représentent pas les lieux anciens, ne s'accordent pas mieux avec les positions observées en 1845. Doit-on attribuer ce désaccord à ce que la théorie n'est pas suffisamment précise? Ou bien cette théorie n'a-t-elle pas été comparée aux observations avec assez d'exactitude dans le travail qui a servi de base aux Tables actuelles? Enfin, se pourrait-il qu'Uranus fut soumis à d'autres influences que celles qui résultent des actions du Soleil, de Jupiter et de Saturne? Et, dans ce cas, parviendrait-on, par une étude attentive du mouvement troublé de la planète, à déterminer la cause de ces inégalités imprévues? Pourrait-on en venir à fixer le point du ciel où les astronomes observateurs devraient faire reconnaître le corps étranger, source de tant de difficultés? »

Ce problème, il le résolut dans une série de quatre Mémoires se succédant avec une rapidité incroyable; le premier datant du 10 novembre 1845 et le dernier étant lu à l'Académie des Sciences le 5 octobre 1846, un peu moins d'un an après; onze mois suffirent donc à Le Verrier pour triompher de toutes les difficultés de cette délicate question. Mais avant d'exposer ses recherches il convient de rappeler quelques notions préliminaires.

II. — Considérations générales sur les perturbations astronomiques.

Mouvement elliptique. — L'orbite d'une planète, qui circulerait seule autour du Soleil, serait une ellipse ayant l'un de ses foyers au centre d'attraction, et cette orbite aurait une forme et une position invariables.

La présence de plusieurs planètes autour du Soleil rend la détermination de leurs mouvements beaucoup moins simple. Elles agissent les unes sur les autres proportionnellement à leurs masses et en raison inverse des carrés de leurs distances respectives, et par là elles sont entraînées hors de l'ellipse qu'elles décriraient, et qu'on appelle *mouvement elliptique,* si elles n'obéissaient qu'à l'action du Soleil.

Mouvement troublé. Variations séculaires. — Le mouvement réel de chacune d'elles est dit *mouvement troublé* et la différence entre ce dernier et le mouvement elliptique représente l'ensemble des *perturbations* exercées par les différentes planètes sur l'une d'elles. On parvient à se représenter leur marche par les considérations suivantes : admettons, qu'à une époque donnée, l'action perturbatrice des planètes vienne à cesser sur l'une d'elles; à l'instant elle se mettra en mouvement sur une ellipse dont les éléments dépendront uniquement de cette époque elle-même; il est donc permis de considérer chacune des planètes comme se mouvant suivant une ellipse de forme et de position variables. D'ailleurs la petitesse des masses perturbatrices et leurs grandes distances à l'astre troublé rendent les variations des éléments de cette ellipse fort lentes et négligeables pendant un intervalle de quelques années, de sorte qu'il suffit de les connaître à une époque donnée ainsi que la position correspondante de la planète dans son ellipse, pour juger de toutes les circonstances du mouvement dans les environs de cette époque. La détermination de toutes ces variations lentes, qu'on appelle *variations séculaires,* forme donc la base nécessaire de toute étude théorique des mouvements planétaires et leur connaissance exacte est de la plus grande importance en même temps que d'absolue nécessité. Il est bien clair, d'ailleurs, que si l'on peut apporter aux mouvements planétaires observés les corrections provenant de toutes les perturbations, le mouvement obtenu après correction sera justement le mou-

vement elliptique lui-même que posséderait la planète sous l'action attractive du Soleil seul. Mais ces actions perturbatrices ont des valeurs différentes suivant la masse de la planète troublante et suivant la distance à laquelle elle se trouve de la planète troublée.

Application de ces principes à Uranus. — Pour Uranus en particulier, les seules des sept planètes connues, qui aient une action sensible sur son mouvement, sont Jupiter et Saturne, les autres ayant des masses trop petites et étant à des distances trop grandes. Par conséquent, après avoir corrigé les observations des perturbations dues à ces astres, on retrouvera pour Uranus un mouvement elliptique. Imaginons, au contraire, que nous n'ayons corrigé les positions observées que des perturbations dues à Jupiter, les différences entre ces résultats et ceux que donneraient le mouvement elliptique représenteraient l'action perturbatrice de Saturne.

Cette action perturbatrice, dépendant des masses de Saturne et d'Uranus et de leurs distances, sera une fonction déterminée de la masse de Saturne, des éléments de son orbite et du temps : on conçoit donc que, si l'on dispose d'un nombre assez grand de ces différences à des époques suffisamment distantes, on puisse en déduire les valeurs des éléments et de la masse de Saturne.

Introduction de la planète inconnue. — Ceci posé, imaginons qu'Uranus soit soumise à l'action du Soleil et d'une planète inconnue qui lui soit extérieure et de masse comparable à la sienne : l'action de cette planète sur Uranus sera surtout sensible au moment où les deux astres, en conjonction, seront à leur moindre distance ; à mesure que, par suite de leurs déplacements sur leurs orbites, cette distance augmentera, l'action perturbatrice de la planète inconnue diminuera progressivement ; et l'on conçoit nettement qu'à une certaine distance angulaire de la conjonction elle sera devenue insensible. A partir de cet écart, avant et après, de la conjonction, le mouvement d'Uranus deviendra elliptique ; mais pendant un certain intervalle de temps autour de la conjonction, le mouvement est troublé d'une façon presque symétrique par rapport à cette époque.

En d'autres termes, pendant une grande partie de la révolution d'Uranus, son mouvement se fera suivant une ellipse déterminée, constante de forme et de position ; mais, à partir d'une certaine

époque, cette ellipse se déformera et son plan se déplacera progressivement de petites quantités, il est vrai, mais qui, par leur accumulation, seront bientôt très accessibles à nos moyens de mesure; après un maximum de ces deux effets, qui ne peut être loin de la conjonction des deux planètes, les déformations et déplacements diminueront progressivement, et l'orbite redeviendra constante de forme et de position. Par conséquent, si l'on détermine les éléments de l'orbite d'Uranus, à l'aide des observations correspondant à des portions de cette période de variation, ils ne pourront représenter ni les observations antérieures, ni les observations ultérieures, et les écarts doivent aller de part et d'autre en augmentant progressivement jusqu'à atteindre une valeur constante et maximum.

III. — Calcul des éléments de la planète inconnue. Solution de Le Verrier.

Calculs préparatoires. Examen des hypothèses possibles. — Nous pouvons maintenant revenir au problème d'Uranus. Pour résoudre la question en litige, il fallait tout d'abord connaître, aussi exactement que possible, l'ellipse qu'aurait, abstraction faite de l'astre inconnu, décrite cette planète sous l'action du Soleil seul et, par suite, calculer avec les données les plus récentes les perturbations que Jupiter et Saturne produisaient sur elle; pour cela l'orbite approchée, ou pour mieux dire temporaire, de Bouvard, suffisait évidemment. C'est l'objet du premier Mémoire de Le Verrier.

Il fallait ensuite comparer les positions théoriques ainsi obtenues aux positions observées, soit avant, soit après la découverte d'Herschel et, par suite, pour les observations anciennes recalculer par les méthodes modernes les positions correspondantes. On constata qu'il restait alors entre les positions ainsi calculées et les positions observées des écarts offrant ce caractère que, par exemple, pour les observations modernes, nuls vers 1830, ils augmentent rapidement en sens inverse, de part et d'autre de cette date jusqu'à atteindre 2′ de longitude en 1845.

Observations anciennes.		Observations modernes.					
Années.	Diff.	Années.	Diff.	Années.	Diff.	Années.	Diff.
1690.	— 66″,9	1781.	— 14″,8	1802.	— 32″,8	1822.	— 29″,6
1712.	— 62,5	1782.	— 17,1	1803.	— 35,8	1823.	— 22,8
1715.	— 67,8	1783.	— 20,5	1804.	— 37,2	1824.	— 28,0
1750.	+ 35,3	1784.	— 20,6	1805.	— 36,0	1825.	— 28,6
1755.	+ 33,1	1785.	— 21,3	1806.	— 33,3	1826.	— 21,3
1756.	+ 33,6	1786.	— 23,4	1807.	— 35,7	1827.	— 21,8
1764.	+ 21,2	1787.	— 24,6	1808.	— 34,4	1828.	— 17,5
1768.	+ 10,7	1788.	— 26,4	1809.	— 36,0	1829.	— 7,8
1769.	+ 8,8	1789.	— 29,7	1810.	— 37,3	1830.	— 3,4
1771.	+ 11,9	1790.	— 28,2	1811.	— 32,7	1835.	+ 27,1
		1791.	— 28,9	1812.	— 38,2	1836.	+ 33,5
		1792.	— 27,4	1813.	— 37,5	1837.	+ 41,3
		1793.	— 32,6	1814.	— 40,1	1838.	+ 51,2
		1794.	— 29,5	1815.	— 34,9	1839.	+ 59,3
		1795.	— 31,7	1816.	— 34,4	1840.	+ 66,9
		1796.	— 31,5	1817.	— 32,8	1841.	+ 72,8
		1797.	— 31,4	1818.	— 34,8	1842.	+ 81,4
		1798.	— 32,3	1819.	— 30,8	1843.	+ 96,1
		1799.	— 29,3	1820.	— 31,9	1844.	+ 98,4
		1800.	— 33,1	1821.	— 29,8	1845.	+ 116,7
		1801.	— 33,4				

Était-il possible de faire disparaître ces écarts en modifiant convenablement les éléments de l'orbite admise pour Uranus? C'était évidemment le premier point à éclaircir et, dans son Mémoire, Le Verrier en démontre la complète impossibilité : il faut donc, de toute nécessité, faire intervenir une cause étrangère; serait-ce un gros satellite accompagnant la planète? Mais alors les oscillations qui affecteraient la marche d'Uranus auraient une très courte période (quelques mois); c'est précisément le contraire qui résulte des observations, les inégalités qui nous occupent se développant avec une grande lenteur. De plus, ce satellite, à cause de ses dimensions, aurait difficilement pu échapper aux observateurs. Serait-ce une comète qui, tombant sur Uranus, aurait, à une certaine époque, changé brusquement la grandeur et la direction de son mouvement? Mais alors, une fois la modification produite, elle serait restée permanente et, par suite, ou bien ce mouvement aurait répondu aux observations anciennes, ou bien il aurait été d'accord avec les observations récentes; c'est encore le

contraire de ce que nous avons constaté, la série intermédiaire des observations de 1783 à 1820 ne s'accordant ni avec celles qui la précèdent ni avec celles qui la suivent.

Les irrégularités du mouvement d'Uranus ne peuvent s'expliquer que par l'action d'une planète inconnue. Premières données sur ses éléments. — Il ne reste d'autre hypothèse à essayer que celle d'un corps agissant d'une manière continue sur Uranus et changeant son mouvement d'une manière très lente. D'après ce que nous connaissons sur la constitution du système solaire, ce corps ne peut être qu'une planète devant, d'ailleurs, peu différer au point de vue physique d'Uranus elle-même.

Où placer cette planète encore inconnue?

Elle ne peut être intérieure à Saturne qu'elle troublerait alors plus qu'Uranus, ce qui est contraire aux faits; pas plus que située entre Saturne et Uranus, car, pour ne point troubler la première, elle devrait, d'une part, être tout près d'Uranus (ce qui constituerait une anomalie considérable à la loi de Bode) et, d'autre part, sa masse devrait alors être très faible, les effets constatés étant eux-mêmes petits; et, enfin, le peu de différence entre les durées de révolution des deux astres feraient que les variations de forme et de position de l'orbite perturbée et, par suite, les écarts constatés seraient beaucoup plus lents qu'ils ne le sont en réalité. Il faut donc supposer la planète perturbatrice au delà d'Uranus. Elle ne peut d'ailleurs en être voisine par suite de ce que nous venons de dire, ni très éloignée, car alors son action troublante serait presque toujours insensible ou, sa masse étant alors considérable, de même valeur sur Saturne et sur Uranus, ce qui est contraire aux faits. En l'absence de toute autre donnée, le plus sage était de supposer qu'elle obéit à la loi de Bode et, par suite, en forçant un peu, que sa distance moyenne au Soleil est double de celle d'Uranus; on avait ainsi le moyen mouvement de la planète inconnue. D'ailleurs, Jupiter, Saturne et Uranus ayant des orbites très peu inclinées sur l'écliptique, on pourra, dans une première approximation, supposer qu'il en est de même pour la planète inconnue.

Énoncé plus précis du problème. — Le problème à résoudre s'énonce donc ainsi :

Est-il possible que les inégalités d'Uranus soient dues à l'action d'une planète située dans l'écliptique à une distance moyenne double de celle d'Uranus?

Si l'on pouvait déterminer, à chaque époque, la variation des perturbations dues à l'action de l'astre inconnu, on en déduirait la direction suivant laquelle tombe Uranus, par suite de l'action incessante du corps troublant; on connaîtrait ainsi la position de ce corps. Mais le problème est beaucoup moins simple; il faudrait, en effet, connaître les valeurs rigoureuses des éléments de l'ellipse décrite par Uranus autour du Soleil, éléments qui ne peuvent se déterminer que si l'on connaît exactement la quantité des perturbations; dans la solution, les éléments des orbites d'Uranus et de la planète inconnue ne peuvent donc se séparer les uns des autres, et il faut les obtenir en même temps, c'est-à-dire déterminer à la fois et les éléments de la planète inconnue et les corrections qui, apportées aux éléments adoptés pour Uranus, les rendraient exacts. On est étonné que Le Verrier n'ait point reculé devant la difficulté énorme qu'offrait au premier abord la solution d'un problème si compliqué.

Route à suivre pour sa solution. — Il n'y a, d'ailleurs, pour le résoudre qu'une seule route à suivre :

« Il faudra former les expressions analytiques des perturbations dues au nouveau corps, en fonction de sa masse et des éléments inconnus de l'orbite qu'il décrit. Il faudra introduire ces perturbations dans les coordonnées d'Uranus calculées au moyen des éléments adoptés pour son orbite autour du Soleil et de leurs corrections inconnues; puis égalant les coordonnées ainsi obtenues aux coordonnées observées, on prendra pour inconnues, dans les équations de condition qui en résulteront, non seulement les corrections des éléments de l'orbite décrite par Uranus, mais encore les éléments de l'ellipse décrite par la planète troublante dont on cherche la position. »

Étant donnée la complexité du problème, Le Verrier partagea la solution en deux : un premier calcul devait donner des valeurs approchées des éléments inconnus, valeurs que l'on améliorerait ensuite. On commença donc par n'utiliser qu'un certain nombre des observations d'Uranus, celles qui correspondent aux oppositions : la

longitude héliocentrique d'Uranus diffère alors fort peu de celle de la Terre, et les calculs en sont simplifiés; malgré cela, une grosse difficulté se présenta bientôt.

Par suite même de la complication de ces équations, il fut impossible de les réduire à une équation définitive ne contenant qu'une inconnue et permettant, par suite, d'en obtenir la valeur. On dut recourir à la méthode des essais successifs, c'est-à-dire attribuer à l'une des inconnues, la position de la planète troublante à une époque donnée, une série de valeurs successives et voir ensuite quelle était celle de ces valeurs qui satisfaisait le mieux aux conditions à remplir. On était d'ailleurs aidé par ce fait qu'on pouvait éliminer de parti pris toutes les valeurs qui auraient donné pour la masse de cette planète des valeurs négatives, ou encore des valeurs assez fortes pour qu'elles puissent avoir sur Saturne une action perturbatrice qui n'existe pas réellement. Les valeurs auxquelles on arrivera ainsi ne pourront d'ailleurs, évidemment, être considérées comme définitives, mais seulement comme un moyen d'obtenir ultérieurement plus d'exactitude.

Première approximation. — Comme conclusion de ses laborieux et pénibles calculs et de la discussion véritablement géniale de leurs résultats, l'illustre astronome arrive à cet énoncé :

On peut représenter toute les observations d'Uranus au moyen de l'action perturbatrice d'une planète dont la masse rapportée à celle de la Terre serait comprise entre 1 *et* 3,5, *dont la longitude moyenne au* 1er *janvier* 1800 *était voisine de* 252° *et qui serait à fort peu près à* 325° *de longitude héliocentrique au* 1er *janvier* 1847.

L'existence de la planète inconnue était mise hors de doute.

Seconde approximation. — Il s'agit maintenant de perfectionner la connaissance approchée qu'on a de son orbite et de sa masse. C'est l'objet du troisième Mémoire. Jusqu'alors on avait dû, pour ne pas rendre les discussions interminables, se borner à l'emploi d'un certain nombre d'observations convenablement choisies; actuellement on emploiera toutes les observations anciennes (19) et 262 observations choisies parmi celles faites de 1781 à 1845, soit dans les oppo-

sitions, soit dans les quadratures. Chacune des longitudes déduites des observations, comparée avec la longitude donnée à la même époque par la théorie, fournit une équation de condition entre les corrections des éléments de l'orbite d'Uranus, la masse et les éléments de l'orbite cherchée, soit en tout neuf inconnues. En groupant convenablement ces équations, on en a formé d'autres au nombre de 33 qui sont comme la condensation du problème. Leur solution directe serait très compliquée; aussi profite-t-on des valeurs approchées obtenues précédemment pour les ramener à une forme plus simple; au lieu du demi-grand axe et de la longitude de l'époque eux-mêmes, par exemple, on a pris pour inconnues les corrections dont ont besoin les valeurs approchées précédentes, corrections qui, par leur petitesse relative, se prêtent mieux à l'emploi des procédés d'approximation; quoi qu'il en soit, les valeurs ainsi trouvées pour les inconnues, seront toutes déduites directement des observations et aucune ne dépendra d'une supposition arbitraire quelconque. Voici les éléments que Le Verrier a conclus de ces longues discussions, ainsi que la position de la planète au 1er janvier 1847; on verra qu'ils diffèrent peu des premières valeurs approchées.

Éléments et positions.

Distance moyenne au Soleil	36,154
Durée de la révolution sidérale	217ans.387
Excentricité	0,10761
Masse : sensiblement celle d'Uranus.	
Longitude du périhélie au 1er janvier 1847	284°45′
Longitude héliocentrique de la planète au 1er janvier 1847	326°32′
Distance au Soleil le 1er janvier 1847	33,06

Comparaison avec l'observation. — Les longitudes calculées à l'aide de ces éléments diffèrent fort peu des longitudes observées et aussi souvent en plus qu'en moins; de sorte que la précision obtenue est au moins égale à celle qu'offraient alors les théories de la plupart des planètes connues; il faut ajouter que le rayon vecteur s'est trouvé rectifié de lui-même sans qu'on l'eût pris en considération d'une manière directe.

Dates des observations.	Différence $P_c - P_0$.	Dates des observations.	Différence $P_c - P_0$.
	″		″
1690	—19,9	1807-1808.....	+ 2,1
1712-1715.....	+ 5,5	1808-1810.....	+ 0,8
1750	— 7,4	1811-1813.....	— 0,5
1753-1756.....	+ 4,0	1813-1815.....	— 0,9
1764	+ 4,9	1816-1817.....	+ 0,4
1768-1769.....	+ 3,7	1818-1820.....	+ 0,4
1781-1782.....	+ 2,3	1821-1823.....	+ 0,9
1783-1784.....	+ 0,1	1824-1827.....	— 5,4
1785-1788.....	— 1,2	1828-1830.....	— 2,2
1789-1790.....	— 3,4	1835	— 0,8
1791-1792.....	+ 0,3	1835-1836.....	+ 2,3
1792-1794.....	— 0,5	1837-1838.....	+ 2,5
1795-1797.....	— 1,0	1839-1840.....	+ 2,2
1797-1801.....	+ 0,9	1841-1842.....	— 0,2
1802-1804.....	+ 0,8	1843-1844.....	— 0,4
1804-1806.....	+ 0,8	1844-1845.....	— 0,3

Conditions de recherche. Aspect physique de l'astre inconnu. — Ceci plaçait le nouvel astre à 5° environ à l'est de l'étoile δ du Capricorne; il en résultait aussi que, l'opposition ayant eu lieu le 19 août 1846, on était alors (31 août 1846) et l'on resterait assez longtemps dans des conditions très favorables pour sa recherche dans le ciel.

Mais le succès de cette recherche dépendait évidemment du degré de visibilité de l'astre; il était facile d'être renseigné à ce sujet. En effet, à sa distance moyenne du Soleil, le disque d'Uranus apparaît sous un angle de 4″; en admettant que la densité de la planète inconnue soit la même que celle d'Uranus, ce qui est une limite supérieure, les densités des planètes diminuant à mesure qu'on s'éloigne du Soleil, la valeur connue de sa masse nous montre que la nouvelle planète se présentera sous un angle minimum de 3″,3 et, par conséquent, dans les bonnes lunettes, se distinguera nettement par son simple aspect physique des petites étoiles qui l'entourent; en supposant d'ailleurs à sa surface un pouvoir réfléchissant égal à celui d'Uranus, son *éclat spécifique actuel* sera le tiers environ de celui d'Uranus quand il se trouve à sa distance moyenne du Soleil; la nouvelle planète apparaîtra donc comme une étoile de 8e grandeur.

D'après ces conclusions, et si la position indiquée était assez

approchée, un balayage de la région environnante fait avec une bonne lunette devrait donc, comme cela avait été le cas pour Uranus, amener rapidement à la découverte physique de l'astre inconnu.

Étendue de la zone à explorer. — Une question des plus importantes était donc de déterminer entre quelles limites sa position réelle peut différer de la position calculée, ou, en d'autres termes, quelle étendue du ciel on devait explorer autour du point désigné.

Le principe de la méthode si ingénieuse imaginée par Le Verrier pour sa solution est le suivant :

Si l'on adopte pour la planète une durée de révolution déterminée, toutes les autres quantités inconnues peuvent varier de telle manière que, quoique les observations ne soient pas aussi bien représentées qu'auparavant, les erreurs d'observation soient tolérables ; mais, en dernière analyse, en continuant la variation des éléments, une erreur d'observation deviendra intolérablement grande. En faisant varier les éléments en sens opposé, on arrivera à trouver une erreur d'observation intolérable aussi, et ainsi de suite. Si l'on calcule avec ces différentes variétés d'éléments les positions de la planète pour 1847 Janvier 0, le lieu géométrique de leur ensemble sera évidemment une courbe discontinue ou un polygone curviligne ; procédant de même avec différentes durées de révolution, on aura différents polygones : et les durées extrêmes qui puissent être admises seront indiquées par des polygones devenant des points. Si maintenant l'on mène une grande courbe circonscrivant tous les polygones, cette courbe constitue une véritable enceinte dans laquelle la planète sera nécessairement renfermée, de sorte qu'en lui menant des tangentes extrêmes à l'Est et à l'Ouest on aura les limites de longitudes cherchées.

Le Verrier trouva ainsi que la longitude héliocentrique de la planète pour 1847 Janvier 0 n'est certainement pas moindre que 321° et ne peut dépasser 325°. La masse, rapportée à celle du Soleil, est alors comprise entre les valeurs 0,00007 et 0,00021, toutes deux supérieures, mais très comparables à celle d'Uranus.

Telles sont les conclusions de ce grand travail, l'un des plus étonnants et des plus originaux qu'aient eu à enregistrer jusqu'alors les Annales astronomiques.

Confirmation expérimentale. — Sa confirmation expérimentale

ne devait pas tarder, grandement facilitée d'ailleurs par le fait que la Carte de l'heure XXI (315° à 330°) de l'Académie de Berlin, correspondant à la région de la planète inconnue, venait d'être terminée, mais non publiée, par l'astronome Bremiker.

Découverte de la planète. Galle. — Il n'y avait donc qu'à diriger une lunette sur ce coin du ciel pour « savoir immédiatement si quelque chose de nouveau s'y trouvait ». C'est ce que fit l'astronome berlinois Galle le 23 septembre 1846, au reçu de la lettre du 18, par laquelle Le Verrier, alors en possession des résultats définitifs de ses travaux, lui demandait son concours pour leur vérification expérimentale; le jour même, il trouva dans le ciel un astre de huitième grandeur qui n'était pas marqué sur la Carte de Bremiker et dont le diamètre lui parut d'environ 3″. Il fut d'ailleurs comparé aussitôt par Galle et Encke à une étoile voisine; et, le lendemain, ces deux astronomes purent constater qu'il s'était déplacé de $1^m 1^s,7$ en ascension droite et de 21″,5 en déclinaison. C'était donc bien la planète cherchée. Il résulte, en outre, des positions données par Galle et Encke que la planète serait, au 1er janvier 1847, par 327°24′ de longitude héliocentrique. Or, le 31 août 1846, Le Verrier indiquait à l'Académie le nombre 326°32′ comme valeur théorique de cette longitude à la même date. *L'erreur totale* de ce long et pénible travail *n'atteignait donc pas* 1°; elle était de 0°52′.

On conçoit l'enthousiasme qui accueillit, non seulement en France, mais dans l'Europe entière, cette splendide découverte.

A la date du 28 septembre 1846, Encke écrivait à Le Verrier :

« Permettez-moi, Monsieur, de vous féliciter avec une entière sincérité de la brillante découverte dont vous avez enrichi l'Astronomie; votre nom sera à jamais lié à la plus éclatante preuve qu'on puisse imaginer de l'attraction universelle. »

De son côté, Arago s'exprime ainsi :

« M. Le Verrier a aperçu le nouvel astre sans avoir besoin de jeter un seul regard vers le ciel. Il l'a vu au bout de sa plume; il a déterminé par la seule puissance du calcul la place et la grandeur d'un corps situé bien au delà des limites de notre système planétaire. C'est l'une des plus brillantes manifestations de l'exactitude des systèmes astronomiques modernes. »

A ces lignes il convient d'ajouter l'appréciation de Le Verrier sur son œuvre :

« Ainsi, dit-il, la position avait été prévue à moins de 1° près. On trouvera cette erreur bien faible, si l'on songe à la petitesse des perturbations dont on avait conclu le lieu de l'astre. Ce succès doit nous laisser espérer qu'après trente ou quarante ans d'observations de la nouvelle planète on pourra l'employer à son tour à la découverte de celle qui la suit dans l'ordre des distances au Soleil. Ainsi de suite; on tombera malheureusement bientôt sur des astres invisibles, à cause de leur immense distance au Soleil, mais dont les orbites finiront, dans la suite des siècles, par être tracées avec une grande exactitude, au moyen de la théorie des variations séculaires. »

Quelle magnifique promesse et quelle admirable confiance dans la force des méthodes nouvelles !

Conclusion. — Telle est l'histoire de cette belle découverte qui étendait le monde solaire jusqu'à des limites encore non atteintes et, préparant ainsi la voie à des découvertes nouvelles, a maintenu l'Astronomie mathématique française au premier rang, que Laplace lui avait conquis, en même temps que, par l'admiration qu'elle a inspirée, a provoqué les vocations des Tisserand, Poincaré, Callandreau, dont les noms sont une de ses gloires.

IV. — Travaux de John Couch Adams. Origine de ces travaux. Challis. Airy.

Mais là ne s'arrête pas la curieuse histoire de cette nouvelle planète. On apprit bientôt, en effet, que depuis un an un jeune *fellow* de Saint-John's College, à Cambridge, John Couch Adams, élève et ami du célèbre professeur Challis, directeur de l'Observatoire de cette Université, lui avait communiqué, ainsi qu'à l'illustre Airy (22 septembre 1845), les valeurs des éléments de l'orbite de la nouvelle planète et la position qu'elle devait occuper alors dans le ciel, position qui ne différait d'ailleurs pas sensiblement de celle que l'on déduirait pour la même époque des données fournies par Le Verrier. Comment une découverte, à laquelle le monde astronomique attachait une si grande importance, avait-elle pu rester ainsi renfermée dans

un petit cercle d'amis ayant toute l'autorité nécessaire pour la publier et la patronner? C'est ce qu'il n'est point sans intérêt de connaître et qui comporte une instruction philosophique.

La lecture d'un rapport d'Airy à l'Association Britannique (session de 1831-1832) sur les progrès de l'Astronomie, dans lequel cet astronome signalait les irrégularités du mouvement d'Uranus et l'impossibilité de réunir toutes les observations dans une orbite elliptique, amena Adams, alors âgé de 21 ans (1841), à se tracer comme sujet de travail à traiter, lorsqu'il aurait pris ses grades : « Rechercher les irrégularités du mouvement d'Uranus qui n'ont point encore été calculées, en vue de trouver si on les peut attribuer à l'action d'une planète extérieure inconnue, et, si possible, déterminer approximativement les éléments de son orbite, ce qui conduirait probablement à sa découverte. »

Une pareille initiative à un si jeune âge n'est point banale; Adams en poursuivit la mise à exécution en 1843, dès qu'il eut conquis ses grades réglementaires.

Première approximation d'Adams. Simplicité de sa solution par une orbite circulaire. — Sa solution n'a certainement pas le caractère magistral et l'homogénéité absolument indépendante de celle de Le Verrier; mais elle est d'une grande simplicité et, en fait, tout à fait suffisante.

La première question à résoudre est, dit-il, de savoir si une planète extérieure peut rendre compte des inégalités observées. Pour cela, il n'est nul besoin d'une détermination exacte; une première approximation suffit. On supposera donc l'orbite de la planète inconnue circulaire et couchée sur le plan de l'écliptique. Quant à son rayon, la loi de Bode en fournira une limite supérieure, soit deux fois la distance moyenne de Saturne au Soleil.

En ce qui concerne les perturbations à expliquer, il suffit aussi d'en avoir des valeurs approchées; on prendra les erreurs qui forment les seconds membres des équations de condition des Tables de Bouvard pour les observations de 1781 à 1821, et de là jusqu'en 1843 on se servira des différences avec ces mêmes Tables qu'ont publiées les divers observateurs, et surtout ceux de Cambridge et de Greenwich. Ainsi posé, le problème est relativement simple, et sa solution montre immédiatement qu'on peut, en effet, trouver une masse déter-

minée qui, dans ces conditions de mouvement, produise par son action sur Uranus des perturbations s'accordant en général avec les irrégularités observées.

Seconde approximation. Orbite elliptique. — On peut donc maintenant s'avancer avec confiance et aborder une solution plus complète en adoptant une orbite elliptique. Sa solution, datée du 22 septembre 1845, est donnée par les nombres suivants :

Distance moyenne adoptée	38,4
D'où moyen mouvement sidéral en $365^j,25$	1°30′,9
Longitude moyenne au 1er octobre 1845	323°34′
Longitude du périhélie	315°55′
Excentricité	0,1610
Masse (rapportée à celle du Soleil)	0,00001656

Étant donnée cette masse, l'éclat de la planète ne devait pas être inférieur à celui d'une étoile de neuvième grandeur.

Communication de la solution à Airy. Ses objections. — La comparaison des longitudes conclues de ces éléments pour Uranus avec les longitudes observées ayant prouvé que les différences sont en général petites et sans aucun caractère systématique, Adams communiqua à Airy les résultats qu'il avait obtenus. La réponse de ce dernier ne fut point aussi approbative qu'il l'espérait. Après quelques mots d'éloge, celui-ci ajouta : « Mais je serais très heureux de savoir si la perturbation adoptée explique aussi les erreurs du rayon vecteur d'Uranus, erreur qui est actuellement considérable. »

En effet, la presque disparition des erreurs de la longitude obtenue par l'action de cette planète hypothétique faisait bien de son existence un fait possible. Mais, dans le travail d'Adams, il y avait déjà deux hypothèses, l'une sur la valeur du grand axe de l'orbite, l'autre sur l'inclinaison de son plan ; il pouvait paraître imprudent d'en admettre une troisième, à savoir que les erreurs des rayons vecteurs s'expliquaient nécessairement de la même manière que celles des distances angulaires et qu'il n'était pas possible de les expliquer toutes par un changement approprié dans les éléments de l'orbite d'Uranus.

C'était, pour Airy, le véritable argument définitif devant décider la question. C'est avec une grande anxiété qu'il attendait d'Adams une prompte réponse, fermement résolu, si elle était affirmative, à

mettre toute son influence au service de ce travail dès lors bien convaincant et d'en faire décider la publication immédiate. Malheureusement la réponse ne vint qu'un an après, le 2 septembre 1846, et, pendant ce temps, les événements avaient marché à pas de géant.

Regrets d'Airy. Retards apportés à la recherche directe. Ses difficultés. — Airy regretta plus tard (d'autant plus que, comme l'a montré le travail de Le Verrier, cette rectification des rayons vecteurs était une conséquence théorique de celle des longitudes) d'avoir trop obéi à ses scrupules scientifiques : évidemment si, au commencement d'octobre 1845, il avait su que depuis quelques mois déjà était entré en lice un nouveau champion, doué d'une puissance de travail remarquable au service d'une haute intelligence et déjà maître en ce genre de recherches, il aurait passé outre à son désir du mieux, il aurait publié le travail d'Adams, et la planète aurait probablement été découverte en novembre 1845.

Quoi qu'il en soit, la planète inconnue, s'éloignant alors de son opposition, devait être bientôt dans de mauvaises conditions d'observation ; puis c'était chose si nouvelle que d'entreprendre, sur la simple foi de déductions théoriques, un ensemble fort pénible d'observations dont, dans les circonstances actuelles, le succès apparaissait comme très douteux, que Challis décida d'attendre pour le commencer. Il ne le fit que le 29 juillet 1846, 3 semaines avant l'opposition attendue de la nouvelle planète, après la publication des premiers résultats de Le Verrier et la constatation de leur accord avec ceux d'Adams. Le travail projeté était considérable ; il fallait faire un examen sérieux de la bande écliptique du ciel formée, autour du point de longitude 325°, par deux grands cercles distants de 15° en longitude sur une étendue de 5° en latitude de part et d'autre ; étant donné le champ de l'instrument qu'on y destinait, il s'agissait de 80 balayages d'au moins 1 heure répétés trois fois, soit à fort peu près 300 heures d'observation. Mais ce travail pouvait être considérablement réduit, suivant l'époque où l'on rencontrerait la planète, et il aurait été absolument évité si Challis avait possédé la Carte de l'heure XXI de l'Académie de Berlin. Les observations, commencées dès le 29 juillet par le point du ciel où, d'après Adams, la planète devait alors le plus probablement se trouver, continuèrent le 30, puis le 4 août, et, après une interruption causée par le mauvais temps et l'éclat de la Lune,

reprirent le 12 août et se prolongèrent jusqu'à la fin de septembre. Malheureusement, Challis ne put comparer immédiatement les séries successives d'observations. Ce fut un nouvel incident bien fâcheux qui lui enleva, ainsi qu'à Adams, la gloire de la découverte. En effet, dans la portion, non comparée de suite, des séries du 12 août se trouvait, ainsi qu'on l'a reconnu plus tard, une étoile de 8e grandeur qui était absente dans la série correspondante du 30 juillet et qui, par suite, était entrée dans la zone pendant cet intervalle. C'était donc bien la planète cherchée. On n'avait noté d'ailleurs pour elle aucune particularité physique d'aspect.

Réponse d'Adams à Airy. Éléments définitifs. — Pendant que Challis dessinait ainsi le ciel, Adams répondait enfin à Airy (2 septembre 1846) au sujet des rayons vecteurs et lui communiquait de nouveaux éléments calculés avec une distance moyenne un peu moindre (rapport 0,515, au lieu de 0,5) et qui sont :

	Anciens.	Nouveaux.	Le 1er janvier 1847. Le Verrier.
Demi-grand axe	38,4	37,247	36,154
Longitude moyenne au 1er octobre 1846.	325°8′	323°2′	326°32′
Longitude du périhélie	315°57′	299°11′	284°45′
Excentricité	0,16103	0,12062	0,10761
Masse comparée à celle du Soleil	0,00016153	0,00015003	0,0001073
Éclat	9e gr.	9e gr.	Disque de 3″,3 de diamètre

D'un autre côté, les investigations directes de Challis furent arrêtées le 1er octobre par l'arrivée de la découverte de Galle. Mais, le 29 septembre, après avoir lu la note de Le Verrier, dans laquelle celui-ci recommandait expressément la recherche de la planète par son aspect physique, il porta son attention sur ce point. Et sur les 300 étoiles qu'il observa alors, une seule fut notée *comme paraissant avoir un disque :* c'était la planète. On vérifiait ainsi la remarquable prédiction de Le Verrier, « qu'avec une bonne lunette la planète pouvait être reconnue rien qu'à son aspect physique ».

Comparaison des éléments théoriques aux actuels. Conclusions. — Comme conclusion à cette exposition des travaux de Le Verrier et d'Adams, il convient de comparer les éléments qu'ils ont donnés pour

l'orbite de la planète à ceux qui résultent de l'ensemble des observations ultérieures; nous le faisons dans le Tableau ci-dessous :

	Le Verrier, 1847, janvier.	Adams, 1846, août.	*Conn. des Temps pour* 1908, 1850, janvier.
Demi-grand axe.....	36.154	37.28	30.100
Durée de la révolution sidérale.....	$217^{a},39$	$228^{a},48$	$164^{a}78$
Longitude du périhélie....	284°45′	299°11	45°59′43″,1
Inclinaison sur l'ecliptique.	0°0′0″	0°0′0″	1°47′2″,1
Excentricité.....	0,1076	0,1206	0,0090
Masse rapportée au Soleil.	0,00011	0,00015	0,00005

Les éléments, peu différents les uns des autres, de Le Verrier et Adams s'écartent donc beaucoup de ceux déduits des observations ultérieures et, par suite, à l'époque de sa découverte la position dans l'espace de la planète réelle était loin de coïncider avec celle de la planète théorique; elle en différait d'environ 520 millions de kilomètres : cet écart fut assez vite reconnu et certains astronomes, Benjamin Peirce par exemple, en tirèrent cette conclusion que l'astre de Le Verrier et Adams n'était point la planète trouvée par Galle et que la découverte de Neptune « n'était que le résultat d'un heureux accident »; cette assertion était, comme nous allons le voir, souverainement injuste.

Il est en effet facile de comprendre comment, avec ces éléments incorrects, on a pu avoir une position de la planète suffisamment approchée pour en permettre la découverte.

A la base du calcul de Le Verrier il y avait deux hypothèses :

1° Le plan de l'orbite de la planète inconnue était celui de l'écliptique. Cette hypothèse fort probable était, en effet, très voisine de la réalité et n'a point altéré d'une façon sensible les résultats du calcul.

2° La distance moyenne de la planète au Soleil était, conformément à la loi de Bode, le double de celle d'Uranus. Cette seconde hypothèse donne une distance supérieure de $\frac{1}{3}$ à sa valeur réelle et par conséquent devait aboutir à une orbite assez différente de l'orbite réelle.

Mais, la méthode synthétique de calcul adoptée par Le Verrier était telle que cette erreur, tout en ayant une répercussion sur les valeurs des autres éléments de l'orbite, aboutissait finalement à ce résultat que ces différentes erreurs devaient arriver à une sorte de

compensation d'ensemble, relativement à la période des observations de Neptune qui seules nous intéressent en réalité, à savoir celles voisines de la conjonction de Neptune et d'Uranus; il faut remarquer, en outre, que pour la découverte optique de la planète, la détermination, aussi approchée que possible de la direction dans laquelle on devait à une époque donnée la chercher sur la sphère céleste, c'est-à-dire de la longitude héliocentrique correspondante, était seule importante.

Or, pour pouvoir faire concorder ces longitudes théoriques avec les longitudes réelles, le calcul devait compenser cet excès de distance moyenne par une forte excentricité de l'orbite et en même temps rapprocher le plus possible le périhélie de Neptune de l'époque de la conjonction, époque centrale des perturbations. En effet, le mouvement angulaire de la planète devenait alors, de par la loi des aires, beaucoup plus rapide que son mouvement moyen, trop lent, calculé par la loi de Bode.

Quant aux distances de la planète au Soleil, c'est-à-dire quant à la position théorique de la planète dans l'espace, elle n'avait pas grande importance dans la solution du problème actuel; néanmoins la méthode de Le Verrier corrige aussi à cet égard une grande partie de l'erreur originelle en ce qui concerne l'intervalle dont nous nous occupons, la forte excentricité de l'orbite de Le Verrier ramenant cette distance à ne plus différer alors que de $\frac{1}{14}$ de sa valeur réelle.

Ces quelques remarques simples suffisent à faire comprendre pourquoi, malgré l'inexactitude de l'orbite théorique de Le Verrier, cet astronome a pu obtenir pour la longitude de la planète inconnue, au 1er janvier 1847, une valeur ne différant que de 1 degré de celle qu'a donnée l'observation directe de Galle.

Dans la comparaison de la longitude théorique avec la longitude réelle, il faut encore tenir compte d'une autre source de différences qui est la suivante : la solution du problème qu'on se proposait était au-dessus de la précision des observations dont on disposait; elles étaient, en effet, entachées d'erreurs atteignant parfois une fraction importante des perturbations elles-mêmes, et par conséquent, les quantités minimes d'où pouvaient être déduits les éléments, étaient toutes erronées d'une fraction notable d'elles-mêmes; on ne pouvait donc obtenir pour ces derniers leurs valeurs réelles.

CHAPITRE VIII.

PLANÈTES INTRAMERCURIELLES ET EXTRANEPTUNIENNES.

Le monde planétaire est-il limité aux corps que nous lui connaissons actuellement? Où existe-t-il, au delà de Neptune et en deçà de Mercure, quelques planètes inconnues? Ces deux questions ont fréquemment préoccupé Le Verrier.

En effet, à peine Neptune a-t-elle été vue qu'il annonce, pour trente ou quarante ans plus tard, la découverte de la planète qui la suit. De même un désaccord de 39″, entre le mouvement séculaire observé du périhélie de Mercure et celui que la théorie lui avait donné, lui fait, en 1859, présumer l'existence d'une planète intérieure à Mercure et dont l'attraction produirait cette différence. Occupons-nous d'abord de cette dernière.

Planète intramercurielle. — Si cette planète existe, sa durée de révolution est relativement courte et, par suite, elle doit très fréquemment paraître traverser le disque du Soleil : la surveillance de ce disque doit donc nous la faire apercevoir. En effet, le 26 mars 1859, peu après la publication de Le Verrier, le Dr Lescarbault vit « un point noir d'un diamètre petit mais appréciable décrire en $1^h 18^m$ de temps moyen une petite corde du disque solaire dont l'inclinaison sur le plan de l'écliptique était environ 6° ». Après une enquête faite par lui-même, Le Verrier déclara que « cette observation devait être admise dans la Science ». D'après ses données la distance de la planète (d'orbite supposée circulaire) serait de 0,143 et la durée de sa révolution $19^j,7$. L'attention ayant été ainsi appelée sur ces passages, on en retrouva bientôt beaucoup d'autres dans les Annales astronomiques. Le Verrier en fit une discussion complète, et leurs combinaisons variées avec le passage de 1859 le conduisit, non pas à une seule orbite, mais à plusieurs très différentes les unes des autres. De sorte

que, ou bien il y avait plusieurs planètes intramercurielles, ou bien il n'y en avait aucune. On aboutit d'une autre manière à la même conclusion; supposons qu'il n'existe qu'une planète entre Mercure et le Soleil, et admettons-lui un diamètre 5 fois plus petit que celui de Mars (c'est-à-dire 0,1 de celui de la Terre), elle aurait, à la distance 0,15, le même éclat que celui-ci, et aurait par conséquent été déjà aperçue. D'autre part, pour produire l'effet constaté sur le périhélie de Mercure, il faut une masse égale à 0,141 (Terre = 1); on devrait alors, avec les dimensions admises, donner à cette planète, si elle était unique, une densité égale à 141 fois celle de la Terre, hypothèse absolument inadmissible; le système intramercuriel, s'il existe, est donc composé d'un groupe de plusieurs planètes; il n'y a d'ailleurs pas lieu de leur supposer une densité bien différente de celle de Vénus et de Mercure; il faudrait 141 de ces corps pour produire l'effet constaté. A la distance de 0,15, chacun d'eux aurait un diamètre apparent de 4″ environ; en outre, en supposant à leurs orbites une inclinaison de 15°, double de celle de Mercure, chacun d'eux passerait une fois par an sur le disque solaire, ce qui ferait en tout par an 141 passages, dont quelques-uns pouraient durer 4 heures.

Or, il est impossible qu'au moins quelques-uns des nombreux observateurs, qui s'occupent assidûment du Soleil, n'aient pas aperçu des taches de 4″ se déplaçant sur l'astre radieux et aussi qu'un certain nombre de corps de cet éclat n'aient été vus autour du Soleil pendant les éclipses totales.

S'ils existent, ces astres intramercuriels sont donc beaucoup plus petits encore, de façon que chaque composante du groupe est très petite par rapport à la somme des autres. Or, Newcomb l'a démontré en 1865, ce groupe de planètes devrait alors produire en même temps que le mouvement de 39″ par siècle du périhélie, un mouvement rétrograde de 30″ du nœud, mouvement que l'observation n'indique pas.

Il semble donc que, du côté du Soleil, le système planétaire se limite à Mercure.

Planètes extraneptuniennes. — Reste la planète *extraneptunienne*. Supposons-lui le même volume et le même albedo qu'à Neptune; et, d'autre part, admettons d'après la loi de Bode que sa distance à Mercure et, par suite, au Soleil, soit double de celle de Neptune, les éclats de ces deux planètes vues de la Terre seront à fort

peu près dans le rapport de 1 à 2, et la différence de leurs grandeurs stellaires de $1^{gr},20$. La nouvelle planète serait donc une étoile de 9e à 10e grandeur; si elle existait, elle aurait été trouvée depuis longtemps par les astronomes lors de la construction des cartes écliptiques.

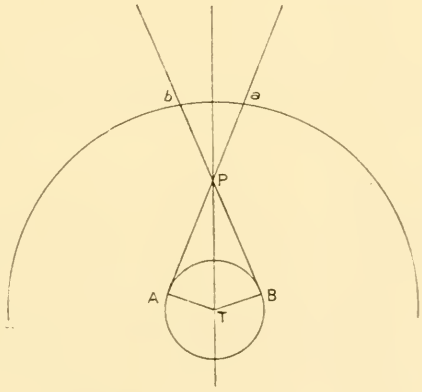
Conclusion. — Nous devons donc admettre qu'il n'existe, ni au delà de Neptune, ni en deçà de Mercure, d'astre analogue, par ses dimensions et sa constitution, aux planètes que nous avons étudiées précédemment.

CHAPITRE IX.

DISTANCES DES PLANÈTES AU SOLEIL.

Définition de la parallaxe. — Les distances des planètes au Soleil sont liées par la troisième loi de Képler, qui fait dépendre leurs rapports de ceux de leurs durées de révolution; il suffit donc d'estimer l'une d'entre elles par rapport à nos unités terrestres pour les avoir toutes. L'unité, choisie pour cela, est le rayon équatorial de la Terre, et la quantité que l'on mesure est l'angle que forment entre elles les droites menées de la planète aux deux extrémités de ce rayon. Lorsque l'une d'elles lui est perpendiculaire, c'est-à-dire lorsque, vue de la

Fig. 71.



Terre, la planète est sur l'horizon de l'observateur, cet angle, qui mesure le rapport du rayon équatorial terrestre à la distance de la planète à la Terre, s'appelle *Parallaxe horizontale équatoriale;* dans le cas du Soleil, si cette distance est sa distance moyenne, il s'appelle *Parallaxe horizontale équatoriale moyenne du Soleil.* C'est l'une des données fondamentales de l'Astronomie; elle corres-

pond à l'*Unité astronomique de longueur, unité* qui a précisément pour valeur cette *distance moyenne*. On ne peut évidemment déterminer ces parallaxes que par un effet de perspective; le déplacement réel ou apparent de l'observateur changeant la position relative de l'astre et des étoiles fixes au voisinage desquelles il se projette sur la sphère céleste. Pour simplifier le langage, supposons la Terre sphérique et menons (*fig.* 71) par la planète deux tangentes PA et PB à la Terre; l'angle APB sera le double de la parallaxe, et si nous supposons le rayon de la sphère céleste assez grand pour que par rapport à lui les distances telles que PA soient négligeables, sa projection *ab* sur cette sphère en donnera la mesure.

Mesure de la parallaxe. Méthode des déclinaisons. — Or si les deux points A et B sont sur un même méridien, l'arc *ab* sera la différence des déclinaisons de la planète observées aux deux lieux A et B; la mesure de cette déclinaison en deux lieux de la Terre assez distants, et appartenant par conséquent à des hémisphères différents, mais dont les méridiens soient sensiblement les mêmes, donnera immédiatement la mesure de la parallaxe cherchée.

Méthode des ascensions droites. — Supposons maintenant que les deux points A et B soient sur l'équateur, aux extrémités de son diamètre perpendiculaire au méridien précédent; l'arc *ab*, si nous pouvions le mesurer, nous donnerait encore la parallaxe. Or, au lieu de supposer deux observateurs différents, l'un en A l'autre en B, nous obtenons le même effet en observant l'astre en un même lieu à 12 heures de distance, la rotation de la Terre ayant, pendant cet intervalle, amené en B l'observateur qui était en A. Mais alors l'arc *ab* ne se mesurera plus suivant un arc du méridien, mais suivant un arc perpendiculaire; ce sont les ascensions droites qui interviennent ici. En un lieu pas trop distant de l'équateur, on mesurera, vers le lever de la planète, puis vers son coucher, la différence de son ascension droite avec celles d'un certain nombre d'étoiles voisines : le changement survenu dans cette différence, d'une observation à l'autre, fera connaître la parallaxe cherchée [1].

---

[1] On suppose bien entendu que l'on a tenu compte de la portion de ce changement dû au déplacement de la planète sur son orbite pendant cet intervalle.

Résultats. — De ces deux méthodes, la première est de beaucoup la plus ancienne : elle a été projetée d'abord pour la Lune en 1705 par Wagner et Kolb, entre Berlin et le cap de Bonne-Espérance, mais non exécutée par la faute de Kolb; elle a été réellement inaugurée de 1751 à 1755 par Lacaille au cap de Bonne-Espérance, pour déterminer la parallaxe de la Lune et celle de Mars à l'aide d'observations faites en même temps en Europe par Cassini à Paris, Lalande à Berlin, Zanotti à Bologne et Bradley à Greenwich, et depuis les astronomes y ont eu très souvent recours. Mais la précision des instruments et des procédés d'observation augmentant peu à peu, il devint nécessaire de ne déduire l'effet parallactique que d'observations faites, en un même lieu, avec un même instrument, et par un même observateur. Aussi, la seconde méthode est-elle actuellement la seule admise; et ce sont les astéroïdes que l'on choisit comme objets d'observation, à cause de la similitude de leurs images focales avec celles des étoiles. On en a fait tout récemment une application grandiose à la planète Éros : 88 observatoires, répartis dans les cinq continents, ont, pendant six mois, matin et soir, soit avec l'héliomètre, soit par des mesures micrométriques, soit encore à l'aide de plaques photographiques prises en temps convenables et étudiées ensuite, mesuré les différences de position relative de cette planète avec des étoiles voisines choisies à l'avance et dont on déterminait aussi par d'autres moyens les coordonnées absolues.

Le résultat de cette immense entreprise a été de conclure à la valeur

$$8'',81$$

pour la parallaxe horizontale équatoriale moyenne du Soleil. Ceci équivaut à une distance de $149\,161\,000^{km}$ et à une durée de $8^m\,17^s,2$ pour la propagation de la lumière solaire jusqu'à nous.

Il en résulte pour les distances moyennes au Soleil, exprimées en 1000^{km}, des différentes planètes, les nombres suivants :

Mercure.....	57740	Jupiter.....	7760558
Vénus.....	107889	Saturne.....	14228383
La Terre.....	149161	Uranus.....	28614113
Mars.....	227278	Neptune.....	44830689

Quant à la Lune, les déterminations actuelles de sa parallaxe s'obtiennent surtout par la discussion des nombreuses occultations

d'étoiles que détermine son passage à travers les Pléiades et l'amas de Prœsépé. La valeur adoptée par la Conférence internationale des constantes astronomiques est

$$57'2'',55 = 3422'',55$$

pour la Parallaxe horizontale équatoriale moyenne, c'est-à-dire correspondant à la distance moyenne de la Lune à la Terre, quantité qu'on appelle aussi *Constante de la parallaxe lunaire.* Ce nombre équivaut à dire que cette distance moyenne est égale à 60,3 *fois le rayon équatorial de la Terre.*

DEUXIÈME PARTIE.

SATELLITES.

Comme nous l'avons dit, les planètes sont en général accompagnées de corps beaucoup plus petits qu'elles-mêmes qui en tirent fort probablement leurs origines et restent sous leur dépendance, rattachés à elles par un lien mécanique étroit, le même qui rattache les planètes au Soleil, et dont l'énoncé mathématique forme ce que l'on appelle les *lois de Képler*. Aussi les a-t-on dénommés *Satellites*.

Leur étude est intéressante non seulement pour elle-même, mais aussi par les renseignements qu'ils nous fournissent sur la constitution physique de la planète qu'ils accompagnent.

CHAPITRE I.

SATELLITE DE VÉNUS.

Pendant longtemps les astronomes ont pu croire à l'existence d'un satellite de Vénus. Il aurait été signalé tout d'abord par Fontana, à Naples, en 1645, et noté par lui comme assez éclatant; observé par Cassini, à Paris, en 1672 et 1686; par Short, à Londres, en 1740; par A. Mayer, à Greifswald, en 1759; en 1761, par le P. Lagrange, à Marseille; Montaigne, à Limoges, et Rœdiker, à Copenhague. Le même astronome Rœdiker le revoit en 1764 à peu près en même temps que Montbarron, à Auxerre. Enfin, Horrebow l'observe en 1768.

Mais, depuis cette époque et malgré son éclat assez fort, personne ne l'a revu; ni W. Herschel, ni Lassell, ni Hall, qui ont cependant découvert des satellites excessivement faibles à d'autres planètes. Qu'avaient donc vu les anciens observateurs?

Tout récemment un astronome belge, M. le professeur Stroobant, a montré que dans la plupart des cas on avait pris pour le satellite une étoile plus ou moins brillante qui se trouvait très près de Vénus et que l'observateur n'a pas cherché à identifier quelques jours après.

Ainsi Rœdiker, en 1764, a dû signaler, comme étant un satellite, la planète Uranus (alors inconnue) qui se trouvait à 16′ de Vénus, manquant ainsi l'occasion de découvrir cette planète dix-sept ans avant W. Herschel; en 1761, les 4, 7 et 12 août, le même astronome observa successivement trois étoiles de 5e, 4e et 7e grandeur; de même, ce sont deux étoiles de 8e et 4e grandeur que Short et Horrebow ont vues à côté de Vénus en 1740 et 1768. Il reste encore un certain nombre d'observations inexpliquées. Il est possible qu'elles répondent aux

positions qu'occupaient alors quelques-uns des astéroïdes les plus brillants.

Quoi qu'il en soit, personne ne croit plus à l'existence d'un satellite de Vénus d'éclat égal ou supérieur à celui d'une étoile de 8e grandeur. Mais il se pourrait que cette planète en ait un d'éclat beaucoup plus faible qui serait encore à découvrir.

CHAPITRE II.

SATELLITES DE MARS.

Jusqu'à une époque toute récente, tout le monde croyait Mars sans satellite. Cette croyance était même tellement générale que depuis les essais, d'ailleurs infructueux, de W. Herschel, en 1783, aucune tentative sérieuse n'avait été faite avant 1862 pour solutionner cette question.

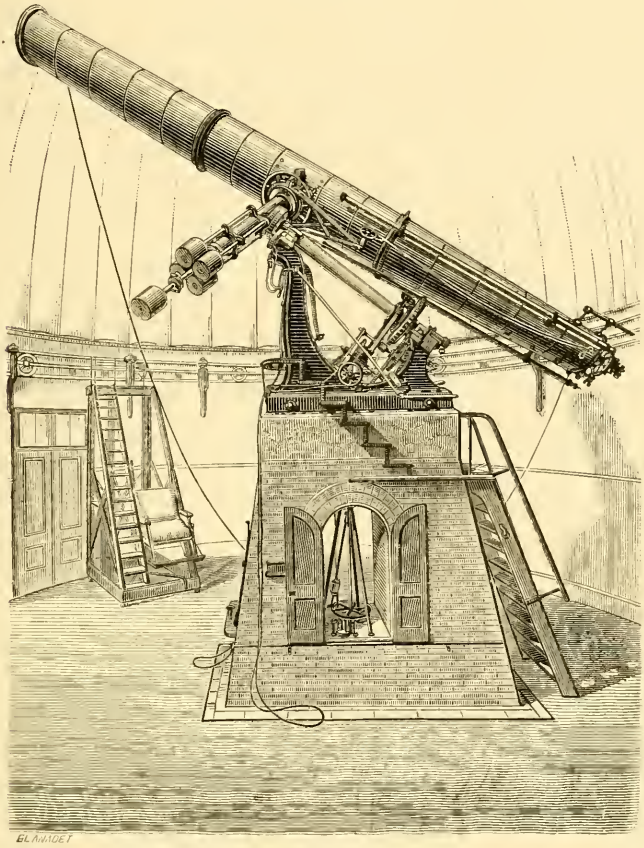
D'Arrest. — A cette opposition, un des plus habiles observateurs du siècle dernier, d'Arrest, entreprit dans ce but, avec l'objectif de $0^m,28$ de l'Observatoire de Copenhague, une étude consciencieuse des alentours de la planète Mars. Malgré les conditions très favorables de cette opposition, ses efforts furent vains. La planète lui parut à lui aussi absolument seule.

Asaph Hall. Découverte de Phobos et de Deimos. Anomalies. — Cependant, à l'opposition de 1877, un astronome de l'Observatoire de Washington, Asaph Hall, décida de consacrer à une nouvelle tentative l'équatorial de $0^m,66$ de cet Observatoire (*fig.* 72), dont l'objectif était célèbre par la découverte du satellite de Sirius; un premier essai lui montra qu'il fallait limiter les recherches au voisinage immédiat de la planète et, dès lors, se soustraire à son grand éclat. C'est pourquoi il conservait toujours la planète juste en dehors à la limite Est ou Ouest du champ, et examinait alors avec l'oculaire toutes les parties de ce dernier.

Les recherches commencèrent avec le mois d'août et, dès le 17 de ce mois, A. Hall annonçait l'existence de deux satellites très voisins de Mars, l'un de 13e, l'autre de 14e grandeur, et qu'il appela *Deimos* et *Phobos*. Le second d'entre eux fut pendant quelques jours un sujet de grande perplexité pour A. Hall qui, le voyant apparaître de

différents côtés de la planète pendant la même nuit et ne pouvant admettre qu'il pût tourner autour de celle-ci en moins de temps qu'elle ne tourne sur elle-même, pensa tout d'abord qu'il devait y avoir là deux ou trois satellites intérieurs. Les nuits des 20 et 21 août,

Fig. 72.



qui furent absolument claires, lui permirent de résoudre cette difficulté. Ces retours fréquents sont bien dus à un seul et même satellite qui, *cas unique dans notre système, met à tourner autour de la planète moins de temps que celle-ci n'en prend pour effectuer sa rotation sur elle-même.* En d'autres termes, Phobos se levant à l'Est pour un habitant de Mars, Deimos se lèverait à l'Ouest.

Les déterminations les plus récentes de leurs diamètres, dues à Lowell, donnent les valeurs :

	Kilomètres.
Phobos	58
Deimos	16

Le satellite intérieur aurait donc un diamètre presque quadruple de l'autre, et cependant, d'après Asaph Hall, Deimos serait de beaucoup le plus brillant; il pouvait en effet l'observer alors qu'il était à une distance moindre de 8″ du limbe de la planète, tandis que toute observation de Phobos devenait impossible lorsque sa distance était inférieure à 25″. De ces deux satellites, le plus gros serait donc le moins brillant; nous avons déjà rencontré pareille singularité dans les quatre plus gros des astéroïdes et nous la retrouverons bientôt dans les satellites de Jupiter.

En outre, l'existence même de satellites si petits, dont le diamètre moyen ne dépasse pas le cinquantième de celui de la Lune (3282^{km}), n'est-elle pas, dans notre système solaire, une anomalie considérable, et comment, dans l'hypothèse de Laplace, comprendre la formation et la durée de pareils astricules? Ne serait-il pas possible que le premier, au moins, d'entre eux ait une origine étrangère au système martien et n'en fasse actuellement partie que par suite d'une captation ultérieure?

CHAPITRE III.

SATELLITES DE JUPITER.

Galilée. — Le premier examen de Jupiter, fait par Galilée avec une lunette, en lui montrant cet astre sous la forme d'un disque de dimension très sensible, net et bien tranché, et lui prouvant ainsi qu'il formait un globe sensiblement sphérique, lui démontra également que cette planète n'était pas seule dans sa course autour du Soleil, mais qu'elle était accompagnée par quatre lunes ou satellites; cette découverte de la plus haute importance et qui eut alors un retentissement considérable se produisit comme il suit :

Le 7 janvier 1610 Galilée aperçut près du disque de la planète, et à peu près sur une même droite, trois petites étoiles, dont deux étaient à l'Est et une à l'Ouest de celle-ci; le lendemain 8, elles étaient toutes trois à l'Ouest; le surlendemain 9, il n'en voyait plus que deux et elles étaient à l'Est du disque; le 13 enfin, c'est quatre étoiles qu'il voit et, toujours à peu près en ligne droite, au voisinage immédiat de Jupiter et, comme le lui montra la suite de ses observations, quatre étoiles dont les positions relatives, soit entre elles, soit par rapport au disque de Jupiter, variaient incessamment; « tous ses doutes se changèrent alors en admiration ». Cette planète avait quatre lunes circulant autour d'elle, comme la Lune autour de la Terre; elle formait à elle seule, et en petit, un système analogue à celui du Soleil, système qui attira alors l'attention universelle et qui, dès le mois de novembre 1610, fut observé à Aix, en Provence, par Peyresc, Gassendi et Gautier, et un peu plus tard (décembre 1610) en Allemagne par Simon Marius ([1]).

J.-D. Cassini, Rœmer, Delambre. — Depuis, les déplacements

([1]) On désigne ordinairement les satellites de Jupiter suivant l'ordre de leur distance à la planète. Mais on leur a aussi donné des noms : Sat. I ou Io; Sat. II ou Europe; Sat. III ou Ganymède; Sat. IV ou Callisto.

de ces satellites par rapport à Jupiter furent suivis par nombre d'astronomes. Mais le rôle de notre pays a toujours été prépondérant, et c'est à J.-D. Cassini, Rœmer, Delambre, Laplace, Damoiseau et Souillart que l'Astronomie est redevable de la presque totalité des connaissances théoriques qu'elle possède sur ce monde intéressant.

Phénomènes des satellites. — Il est d'ailleurs une série de phénomènes curieux qui en facilitent singulièrement l'étude. Ainsi que l'avait remarqué de suite Galilée, les satellites de Jupiter ne sont pas toujours tous visibles à la fois; sur les quatre, l'un ou l'autre d'entre eux semble successivement disparaître. Cela tient à ce que ces satellites, se mouvant à fort peu près dans le plan même de l'orbite de Jupiter, pénètrent souvent (1) (et cela arrive à chacune de leurs conjonctions avec Jupiter pour les trois premiers) dans le cône d'ombre aigu que Jupiter traîne derrière lui et alors deviennent invisibles ou encore passent, au moment de leurs oppositions, soit devant soit derrière son disque et semblent au premier abord avoir également disparu. La première de ces disparitions, qui se produit souvent à une distance sensible du bord de la planète, est une *éclipse* du satellite; les autres un *passage* ou une *occultation* de ce même satellite.

ÉCLIPSES.

Ces phénomènes rendirent alors et rendent encore aux astronomes, pour l'étude des mouvements des satellites, les mêmes services que les éclipses de Soleil et de Lune avaient rendus aux anciens pour l'étude des mouvements de la Terre ou de la Lune.

Le commencement d'une éclipse ou sa fin donne, en effet, une position précise du satellite par rapport à la ligne qui joint Jupiter au Soleil; et, ces phénomènes se reproduisant successivement pour chacun d'eux, en des points progressivement variables de leur orbite autour de Jupiter, il en résulte pour nous au bout de peu de temps une connaissance très étendue des éléments et des circonstances diverses de leurs mouvements.

---

(1) Pendant une de ses années, à peu près douze des nôtres, il y a environ 4400 de ces éclipses, soit 366 pour une de nos années et une pour chacun de nos jours.

Application des éclipses à la détermination des longitudes terrestres. — Mais il y a bien plus; la disparition d'un satellite dans le cône d'ombre de Jupiter au commencement de l'éclipse (ou sa réapparition à la fin) est un phénomène absolu, indépendant de la position de l'observateur à la surface de la Terre et que doivent apercevoir au même instant tous les habitants de cette dernière qui ont alors la planète au-dessus de leur horizon. La différence des heures locales, auxquelles chacun l'a observé, donne donc immédiatement les différences de longitude des lieux correspondants; l'observation de ces phénomènes, pourtant si lointains, offre ainsi un moyen commode d'établir la géographie de la planète que nous habitons; c'est là un des nombreux exemples des relations multiples qui unissent entre elles les différentes parties du système solaire.

Galilée. Renieri. Tables de J.-D. Cassini. — Ce mode de détermination des longitudes, infiniment plus simple et plus exact que ceux que l'on possédait alors, préoccupa Galilée au plus haut point; pour en être maître, il fallait évidemment connaître les mouvements de ces satellites d'une façon assez précise pour pouvoir prédire les époques de leurs éclipses avec une approximation qui rendît pratiquement possible leur observation. Aussi, jusqu'à ce que l'affaiblissement progressif de sa vue le lui ait interdit, c'est-à-dire jusqu'en 1638, il suivit les satellites pas à pas, accumulant les déterminations et les calculs : les éphémérides d'éclipses qui en résultèrent étaient ce qu'il appelait *son secret des longitudes,* secret que successivement il chercha, sans y réussir, à vendre au roi d'Espagne et aux États de Hollande. Devenu aveugle, Galilée confia la suite de ses recherches à son élève, le Père Vincent Renieri, qui put, dès 1640, fournir aux astronomes des Tables évidemment encore assez approximatives, mais cependant de grande utilité.

En 1666, J.-D. Cassini, alors professeur d'Astronomie à Bologne, publia des Tables beaucoup plus précises et qui ont une importance historique considérable, car elles servirent de base à la série d'observations qui conduisit Rœmer à la découverte de la non-instantanéité de transmission de la lumière et à une détermination approchée de sa vitesse.

Passage de l'ombre sur le disque. Fontana. — Un autre phé-

nomène analogue a commencé à être observé en 1643 par l'astronome napolitain Fontana, qui en signala le premier l'importance; c'est le passage de l'ombre d'un satellite sur le disque de Jupiter; lorsqu'ils sont en conjonction inférieure avec la Terre par rapport à Jupiter, ces satellites déterminent, en effet, derrière eux la formation d'un cône d'ombre, que peut traverser la planète à intervalles périodiques et qui y détermine des taches se déplaçant d'un mouvement uniforme de l'Est à l'Ouest suivant une corde de son disque apparent. L'observation du commencement ou de la fin de ces passages donne une position exacte du satellite, en même temps que leur étude complète nous renseigne sur la nature de la lumière que nous envoie Jupiter.

Ces taches sont, en effet, rondes, bien terminées et parfaitement noires : Jupiter ne semble donc émettre aucune lumière propre dans les portions à l'égard desquelles le satellite forme successivement écran : cette planète n'est donc pas lumineuse par elle-même et ne brille que par la lumière que lui envoie le Soleil et qu'elle réfléchit dans l'espace.

Passages des satellites sur le disque et leurs occultations. J.-D. Cassini. — Vers les époques où l'on aperçoit les ombres des satellites se mouvoir suivant des cordes du disque de Jupiter, ceux-ci se projettent sur la planète. L'observation en a été faite pour la première fois en 1664 par J.-D. Cassini. Depuis de longues années, ces passages, ainsi que les occultations qui, pour les trois premiers satellites, se représentent à chacune de leurs révolutions, sont suivis assidûment dans un certain nombre d'observatoires. Outre les données qu'ils ont fournies pour l'étude des orbites de ces satellites, ils nous ont donné des renseignements physiques intéressants sur le système jovien tout entier.

Lorsque les passages se font dans la partie moyenne du disque (jusqu'à 30° ou 40° de latitude jovienne), on a constaté qu'après l'entrée les satellites restaient tous visibles pendant un certain temps, parfois 30 minutes, sur le bord de la planète, pour disparaître à mesure qu'ils approchaient du centre; de même à la sortie on les voit toujours réapparaître quelque temps avant qu'ils soient en contact avec le disque. Les portions marginales de Jupiter sont donc moins lumineuses que les satellites et en général moins lumineuses aussi que les parties plus centrales de même latitude; lorsque la projection du

satellite se fait sur l'une des bandes sombres équatoriales, il reste toujours visible sous forme d'une petite tache claire et brillante [1].

On conclut de ces faits que les satellites ont sensiblement même pouvoir réfléchissant que la majeure partie du disque de Jupiter, mais qu'aussi certaines portions de celui-ci ont un albedo beaucoup moindre.

Relations entre les passages des satellites et ceux de leurs ombres. — Les passages des ombres et ceux des satellites ont entre eux des relations intimes. Aux moments des oppositions de Jupiter, les passages de l'ombre d'un satellite et du satellite lui-même sont simultanés ; mais, avant l'opposition, le passage de l'ombre précède celui du satellite et, après l'opposition, il le suit, l'intervalle de temps qui les sépare allant en croissant depuis l'opposition jusqu'à la station voisine, pour décroître ensuite jusqu'à la conjonction, où les deux phénomènes, s'ils étaient visibles pour nous, redeviendraient simultanés.

Les écarts maxima entre les passages de l'ombre et celui du satellite au méridien central sont les suivants pour chacun d'eux : I, $1^h 30^m$; II, $2^h 45^m$; III, $6^h 0^m$; IV, $13^h 30^m$.

Aussi pour le satellite I, lui-même et son ombre seront, à chaque passage, visibles simultanément sur le disque pendant un certain temps d'ailleurs variable suivant l'époque; pour le satellite II, cette présence simultanée sera encore le cas presque général; pour le satellite III, elle n'est plus que fréquente; et pour le satellite IV, on rencontre périodiquement des intervalles d'environ 3 ans où ces simultanéités ne se présentent pas.

Combinaison de ces phénomènes. — La combinaison de ces données prouve que plusieurs satellites peuvent se trouver, simultanément, et en même temps que leurs ombres, sur le disque de la planète; à certaines époques, on y peut donc voir un certain nombre de taches, la plupart obscures, les autres apparentes et de teintes variées, décrire avec des vitesses différentes des cordes parallèles, et parfois se superposant de façon à nous montrer soit le passage d'un satellite sur un autre, soit l'éclipse d'un satellite par l'ombre d'un autre plus éloigné de Jupiter, soit le passage l'une sur l'autre des

---

[1] Lorsqu'elle se fait sur la grande tache rouge, le satellite se montre aussi brillant que lorsqu'il est en dehors du disque.

ombres de deux satellites; de telle sorte que nous pouvons contempler sur le petit espace angulaire du disque de Jupiter des phénomènes beaucoup plus variés que ceux que nous offrent le Soleil et la Lune dans toute l'étendue d'une grande zone de la sphère céleste.

Mêmes phénomènes en dehors du disque de la planète. — Mais l'observation de ces phénomènes si intéressants n'est point limitée au disque de Jupiter; on peut les étudier en un point quelconque des orbites des satellites. C'est ainsi qu'Arnold le 1er novembre 1693 et Luther le 30 octobre 1822 ont observé le passage du satellite III sur le satellite IV.

Mais ces phénomènes n'ont réellement appelé d'une façon régulière l'attention des observateurs qu'à partir de 1902, époque d'ailleurs très favorable et où nous trouvons une douzaine d'observations de ce genre dues pour la plupart à MM. Lauth et Guillaume.

Jupiter sans satellites. — Il peut arriver aussi que tous les satellites de Jupiter soient à la fois ou situés dans la direction de la planète ou entrés dans son cône d'ombre; ainsi que Galilée l'a constaté le 15 mars 1611, Jupiter paraît alors, et pendant quelques heures, absolument seul et sans satellites. Depuis Galilée, cette circonstance a été signalée à différentes reprises, dont voici les époques :

15 mars 1611	Galilée.
12 novembre 1681	Molyneux.
23 mai 1802	W. Herschel.
15 avril 1826	Walles.
27 septembre 1843	Griesbach.
21 août 1867	Divers.
28 mars 1874	»
15 octobre 1883	»
20 octobre 1905	»

Donnons quelques détails sur les plus récents de ces phénomènes.

En 1867, les satellites I, III et IV passaient sur le disque de Jupiter et le satellite II était éclipsé : la période sans satellites a duré 1 heure 45 minutes; en 1874, où les satellites sont restés invisibles pendant 2 heures, le satellite II passait seul sur le disque tandis que le satellite I était éclipsé et que les deux autres passaient derrière la planète; en 1883, où la période sans satellites n'a duré que 19 mi-

nutes, le satellite I était occulté tandis que les trois autres passaient sur le disque de la planète; en 1905 enfin, la période sans satellites n'a duré qu'une minute, les satellites I et III ont été éclipsés et les deux autres se projetaient sur le disque de la planète. Ces disparitions apparentes des satellites se reproduisent évidemment d'une façon périodique et chaque combinaison particulière de situation relative des satellites et de la planète a sa période particulière; par exemple, la combinaison de 1874 a pour période 33 ans 195 jours qui comprend 6923 révolutions du satellite I, 3446 du II, 1711 du III et 731 du IV; la combinaison de 1867 est la même que celle de 1843 et a pour période 23 ans 328 jours qui comprend 4934 révolutions du satellite I, 2458 du II, 1220 du III et 523 du IV.

Relation entre les trois premiers satellites. — Il convient de citer aussi une relation bien remarquable entre les mouvements des trois premiers satellites de Jupiter : *les durées de leurs révolutions sidérales forment une série dont chaque terme est double du précédent.*

On en conclut que le *moyen mouvement du premier satellite plus deux fois celui du troisième est rigoureusement égal à trois fois le moyen mouvement du second satellite.*

Un résultat non moins singulier, et que les observations donnent avec la même précision, est que, depuis la découverte des satellites, *la longitude moyenne du premier, moins trois fois celle du deuxième, plus deux fois celle du troisième, n'a jamais différé de deux angles droits que de quantités presque insensibles.*

Ces deux relations subsistent également entre les moyens mouvements et les longitudes moyennes synodiques : car le mouvement synodique d'un satellite n'étant que l'excès de son mouvement sidéral sur celui de la planète, si l'on substitue, dans les résultats précédents, les mouvements synodiques aux mouvements sidéraux, le moyen mouvement de Jupiter disparaît et les relations restent les mêmes. Il suit de là que, d'ici un très grand nombre d'années au moins, les trois premiers satellites de Jupiter ne seront point éclipsés à la fois; mais, lors des éclipses simultanées du deuxième et du troisième, le premier satellite sera toujours en conjonction avec Jupiter; ce satellite sera toujours en opposition avec Jupiter, dans les éclipses simultanées du Soleil produites par les deux autres satellites sur la planète.

Il résulte de ces lois et des valeurs des moyens mouvements de ces trois satellites qu'au bout d'un peu plus de 437 jours ($437^j,659$) ces trois satellites se retrouvent dans les mêmes situations relatives autour de la planète et que, par conséquent, tous les phénomènes, éclipses, passages ou occultations, se reproduisent ensuite dans le même ordre.

Au point de vue cosmogonique, on doit en conclure qu'il y a eu dans la formation du système de Jupiter quelque chose de spécial aux trois premiers satellites, qui, comme le dit Laplace « semble faire un système à part de ces trois corps animés selon toute apparence par des forces communes sources de leurs communs rapports. »

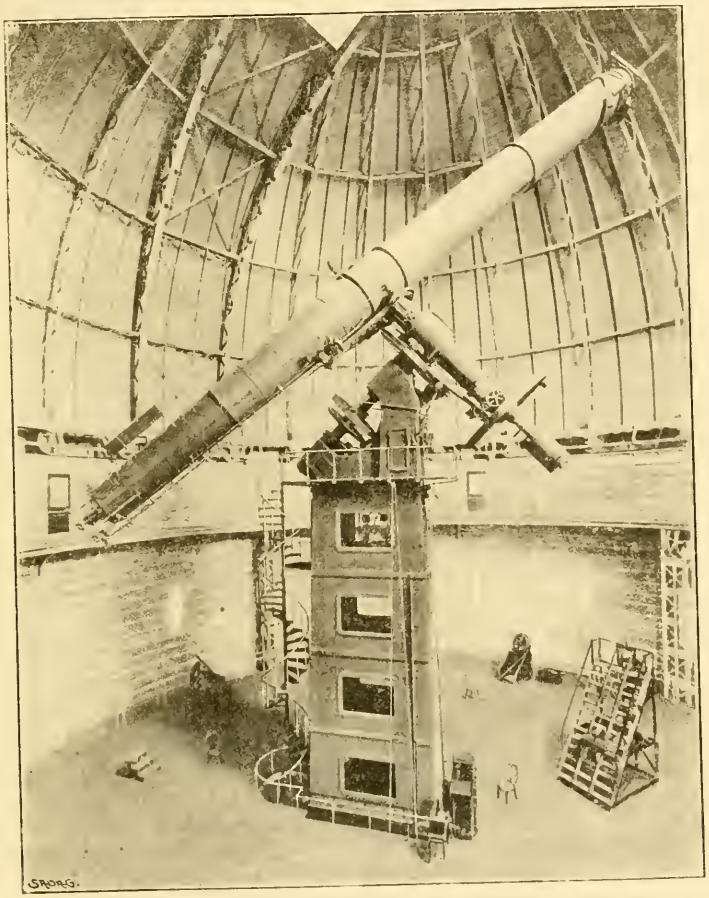
Étude détaillée des satellites.

Diamètres et densités. J.-D. Cassini. Schrœter. Barnard. — Les passages et occultations des satellites de Jupiter comportent d'autres enseignements; ainsi que J.-D. Cassini l'a indiqué le premier, les temps qu'ils mettent à traverser le bord de Jupiter, soit à l'entrée, soit à la sortie, fournissent un moyen indirect de déterminer leurs diamètres apparents; ce fut pendant longtemps le seul dont on disposa, et il a été appliqué en 1798 avec une rare habileté par Schrœter. Depuis, le perfectionnement des instruments d'Astronomie, tant au point de vue optique qu'au point de vue mécanique, a permis de les mesurer directement sur le Ciel; parmi les déterminations les plus récentes, nous adopterons celles qu'a déduites Barnard des mesures micrométriques qu'il a faites en 1894, d'abord avec l'équatorial ($0^m,91$) de l'Observatoire Lick, puis avec la grande lunette ($1^m,05$) (*fig.* 73) de l'Observatoire Yerkes de l'Université de Chicago, et nous en rapprocherons les résultats obtenus un siècle auparavant par Schrœter : ces valeurs se rapportent à la distance moyenne de Jupiter à la Terre.

	Diamètre apparent.		Diamètre en kilom.	Densité par rapport à la Terre.
	Schrœter.	Barnard.		
	″	″		
Io	1,16	1,048	3778	0,20
Europe	0,95	0,874	3150	0,37
Ganymède	1,75	1,581	5843	0,32
Callisto	1,18	1,430	5225	0,25

Les deux derniers satellites sont beaucoup plus gros que les premiers, le troisième étant sensiblement de diamètre double que le second, le plus petit de tous; c'est, au contraire, le second qui est

Fig. 73.



Équatorial de $1^{m},05$ de l'Observatoire Yerkes.

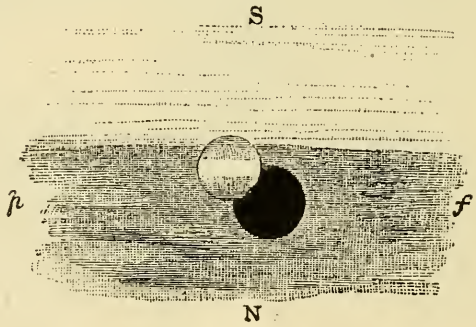
le plus dense et sa densité est sensiblement double de celle du premier, le moins dense de tous; notons d'ailleurs que notre Lune a sensiblement les mêmes dimensions que le premier de ces satellites et que sa densité est à fort peu près double de celle du troisième.

Aspect physique des satellites. — Mais là ne se bornent point les services que nous a rendus et nous rend encore l'observation des passages des satellites sur le disque de Jupiter; ils nous ont permis d'étudier avec quelques détails l'aspect physique de la surface de ces petits corps. En effet, lorsqu'ils sont ainsi projetés, de façon à en faire pour ainsi dire partie, sur la surface de Jupiter d'éclairement fort semblable au leur, les différences même assez faibles de teinte et d'éclat s'y perçoivent assez aisément; tandis que, lorsque avec la même lunette, on les observe sur le fond noir du Ciel, les parties marginales sombres deviennent invisibles et l'on n'aperçoit plus que les parties brillantes médianes, ce qui donne au satellite une forme apparente bien différente de la réalité.

Nous résumons ici ce que les observations nous ont appris sur les divers satellites.

Satellite I. Io. — Le satellite I est partagé en son milieu par une large bande blanche ayant environ le quart de son diamètre ($0'',2 = 361^{km}$), parallèle aux bandes de Jupiter et qui laisse de chaque côté deux calottes sombres, leur ensemble formant un disque rond complet (*fig.* 74).

Fig. 74.

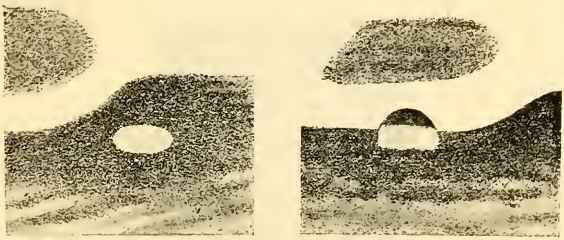


Passage du satellite I (19 novembre 1893), par Barnard ($0^{m},91$, Lick).

Telles sont les apparences observées par Barnard à l'Observatoire Lick en 1893 et 1894 dans les circonstances les plus favorables; mais, dans des cas particuliers, l'aspect peut se modifier suivant les portions du disque sur lesquelles le satellite se projette. A l'entrée, il apparaît toujours comme une petite tache ronde brillante; mais, plus

tard, et c'est le fait le plus fréquent, les calottes sombres disparaissent toutes deux (*fig.* 75), leur teinte étant égale à celle du fond, et la bande blanche reste alors seule visible. Parfois l'une des calottes

Fig. 75. Fig. 76.



$17^h 45^m$ $18^h 10^m$

14 octobre 1894. — Passage du satellite I sur la baie de la Tache rouge.

sombres s'évanouit seule (*fig.* 76), la teinte du fond ayant changé, ou bien, dans d'autres cas, c'est la bande blanche qui s'évanouit, ne laissant plus que les calottes formant à peu près deux bandes sombres parallèles se déplaçant sur le disque.

L'existence de ces calottes polaires sombres semble être un des caractères permanents de ce satellite; leur limitation parallèlement à l'équateur jovien permet de conclure que la rotation du satellite s'effectue autour d'un axe sensiblement perpendiculaire à ce plan; Barnard, sans en pouvoir indiquer la durée, conclut de ses observations qu'elle ne coïncide pas avec celle de la révolution du satellite.

Satellite II. Europe. — Dans la généralité des cas, on ne constate rien de particulier lors des passages de ce satellite.

En dehors de ces passages, à part Schrœter qui croit y avoir observé trois fois des taches occupant un tiers ou un quart de sa surface, aucun astronome n'a signalé le moindre obscurcissement.

Satellite III. Ganymède. — Il n'en est pas de même pour Ganymède, dont Barnard a toujours trouvé le disque irrégulièrement lumineux et comprenant des régions un peu sombres, à bords flous, et variables de forme et de position. Il signale, en outre, l'existence, sur le bord nord du disque de ce satellite, d'une calotte polaire (*fig.* 77), tout à fait semblable à celle de Mars, et qui peut atteindre le quart ou

même le tiers de son diamètre. Elle est d'une permanence absolue, mais, fait curieux, toujours visible dans la partie orientale (par rapport à Jupiter) de son orbite, elle ne l'est jamais dans la partie occidentale.

Fig. 77.

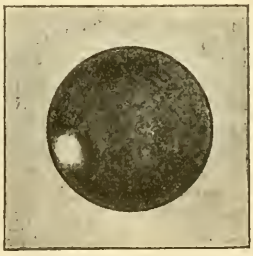
11 décembre 1893.

Dans deux occasions M. Barnard a noté l'existence d'une calotte polaire sud, la calotte nord étant alors invisible. Le satellite tourne donc bien certainement sur lui-même.

De même à deux reprises Barnard a vu, vers le milieu du disque de Ganymède, une bande assez bien limitée et semblable à la bande centrale de Jupiter, mais inclinée de 32° environ sur l'équateur de la planète.

Lors d'un passage sur Jupiter, le 3 septembre 1894, Ganymède présenta un aspect absolument remarquable; c'était alors un disque

Fig. 78.



3 septembre 1894.

bien net et très sombre sur lequel (*fig.* 78), et près de son bord sud, se détachait une petite tache ronde très éclatante, sans qu'on puisse noter d'autres détails sur le satellite.

Satellite IV Callisto. — L'aspect général de ce satellite est tout à fait analogue à celui de Ganymède, et comme lui il a des calottes polaires; mais la plus souvent visible est, cette fois (*fig.* 79),

Fig. 79.

10 décembre 1893.

celle du pôle sud. Cependant, en une occasion, Barnard a constaté la présence d'une calotte polaire nord (à cette date la calotte nord de Ganymède était aussi remarquablement visible).

Lors de son passage sur Jupiter, ce satellite est toujours franchement obscur et souvent aussi noir que son ombre.

Rotation des satellites, leurs durées. W. Herschel. Schrœter. — Tous ces satellites tournent nécessairement sur eux-mêmes, mais, ni pendant les passages, ni en dehors, on n'a pu encore faire de mesures qui donneraient les durées de leur rotation.

En l'absence de ces mesures directes, Herschel et Schrœter ont cherché à les déterminer par l'étude des variations d'éclat que leur semblaient présenter les satellites aux différentes époques.

En notant sur leurs orbites les places où, pendant une longue période, chaque satellite leur avait paru à son minimum ou à son maximum d'éclat, ils crurent reconnaître que ces phénomènes se reproduisent toujours vers les mêmes régions; et de ces coïncidences entre certaines positions et les maxima ou minima d'éclat, ils avaient conclu que, d'une part tous les satellites de Jupiter avaient des surfaces partagées en parties fort irrégulièrement et différemment réfléchissantes et que, d'autre part, ils effectuaient leur rotation axiale dans un temps égal à celui qu'ils emploient à faire leur révolution

autour de la planète, de manière à tourner toujours vers elle la même face.

C'était identifier leur mode de rotation à celui de la Lune et transformer ce cas particulier en une loi générale. Mais les travaux de Darwin ont montré qu'une telle généralisation n'était pas admissible. Il fallait donc recourir à des mesures exactes d'éclat, au lieu de simples appréciations comme celles d'Herschel et de Schrœter.

Engelmann. Ed. Pickering. — Tel est le problème qu'Engelmann a traité en 1870-1871. Au moyen de mesures photométriques directes s'étendant à un grand nombre de révolutions de ces satellites, il a cherché à déterminer la loi exacte des variations de l'éclat apparent. D'après lui, la réponse ne semble pas douteuse pour les trois premiers satellites, la loi d'Herschel et Schrœter n'est point applicable. Quant au quatrième satellite, son opposition est moins vive, la question restait donc en suspens.

Aussi, Ed. Pickering reprit-il cette étude en 1877 et 1878, à l'Observatoire Harvard; la conclusion de sa longue série d'observations, conclusion confirmée plus tard par Spitta, est : « Plusieurs astronomes ont pensé que l'éclat des satellites de Jupiter était variable; cette manière de voir n'est point confirmée par mes mesures qui ne montrent aucune preuve de variation. Pendant le cours des trois dernières années, j'ai eu souvent l'occasion de comparer les satellites de Jupiter et, dans aucun cas, je n'ai été amené à constater d'autre changement d'éclat que celui qui est dû au voisinage de la planète ».

C'est aussi la conclusion que nous croyons devoir tirer de l'étude attentive des courbes de lumière des 4 satellites publiées récemment par M. Guthnick.

Nous admettrons donc que l'on n'a actuellement aucune donnée expérimentale définitive sur les durées de rotation des satellites de Jupiter, et que tout porte à croire que si leur surface présente quelques inégalités d'éclat, elles y sont à peu près uniformément réparties.

Éclats relatifs. Albedos. Pickering et *Spitta.* — Visibles avec la moindre jumelle de théâtre grossissant de quatre à cinq fois, ces satellites ne se voient pas à l'œil nu, le satellite III fait seul exception;

certaines vues l'ont parfois aperçu bien nettement aux moments de ses plus grandes élongations.

Le voisinage de la planète, dans les rayons de laquelle ils se noient pour ainsi dire, est probablement le principal obstacle; car leurs éclats, estimés en grandeurs stellaires, les classeraient en grande partie dans les étoiles lucides; les voici, en effet, d'après Engelmann :

I.....	5,5	II..... ...	5,7
III.....	5,3	IV.....	6,3

Quoi qu'il en soit, ces grandeurs ne donnent aucune idée précise sur leurs éclats par unité de surface qui seuls peuvent les différencier. Il faut pour cela mesurer leurs albedos moyens.

Nous les tirerons des mesures de Pickering et Spitta dont la combinaison donne les valeurs suivantes :

Satellite I.....	0,481
» II.....	0,670
» III.....	0,303
» IV.....	0,138

A cet égard, comme pour les densités, les satellites de Jupiter se partagent donc encore en deux groupes : les deux premiers de moindre volume, ayant un pouvoir réfléchissant sensiblement double de ceux du second groupe. En même temps, le second satellite, qui est le plus petit de tous, a à la fois le pouvoir réfléchissant et la densité maxima, de sorte que, contrairement à ce que nous avons vu pour les planètes, c'est dans ce système le corps le plus compact qui a le plus grand pouvoir réfléchissant.

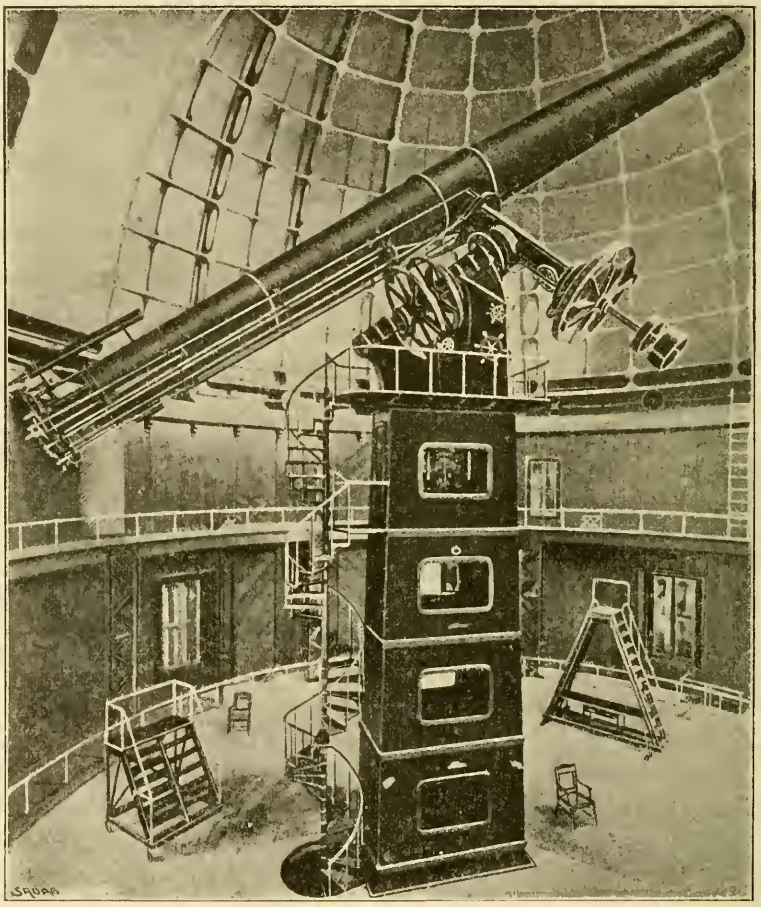
D'autre part, l'albedo de Jupiter ne pouvant différer beaucoup de 0,650, les deux premiers satellites paraissent avoir une constitution superficielle peu différente de la sienne, tandis qu'au contraire celle des deux derniers satellites extérieurs semblerait se rapprocher de celle de Mercure. Ces différences concordent bien avec les aspects physiques de ces deux groupes tels que nous les avons décrits plus haut.

Nouveaux satellites.

Dans ces dernières années le système de Jupiter s'est enrichi de trois nouveaux satellites.

Satellite Barnard V. — La première de ces découvertes est due à Barnard et a été faite le 9 septembre 1892, avec la lunette de $0^m,91$ d'ouverture de l'Observatoire Lick (*fig.* 80) : c'est un

Fig. 80.



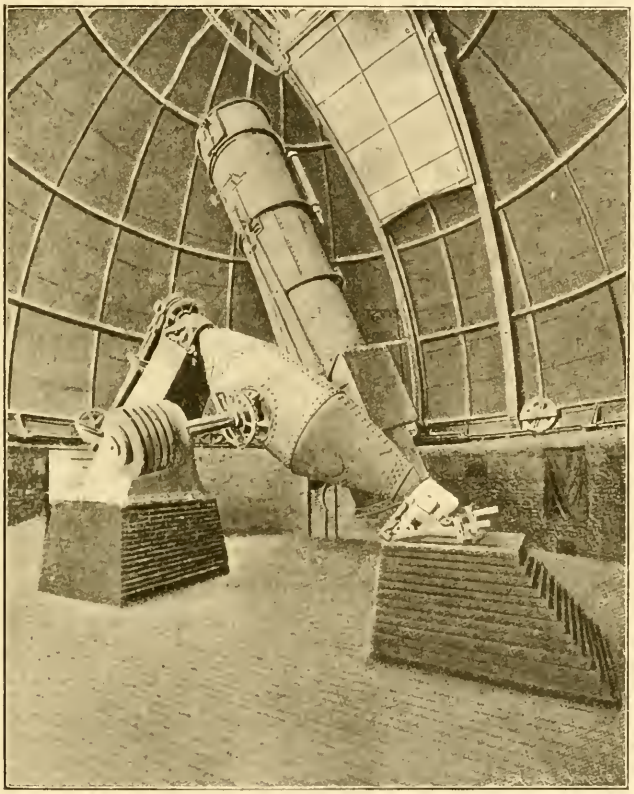
Équatorial de l'Observatoire Lick ($0^m,91$).

satellite beaucoup plus petit que les anciens; quel que soit le grossissement que l'on emploie, il paraît toujours dans la lunette sans aucun disque apparent; c'est un point stellaire de 13e grandeur : son diamètre équivalent en lumière est d'environ 50^{km}, le soixantième

du diamètre du plus petit des anciens ; il tourne autour de Jupiter dans le même plan que ceux-ci, mais il effectue sa révolution en un temps à peine supérieur à celui de la rotation de la planète, dont il n'est séparé que par le double de son rayon.

Satellites VI et VII. — Depuis cette époque l'observation directe ne nous a fourni aucune donnée nouvelle sur le monde de Jupiter :

Fig. 81.



Le télescope Crossley et sa nouvelle monture.

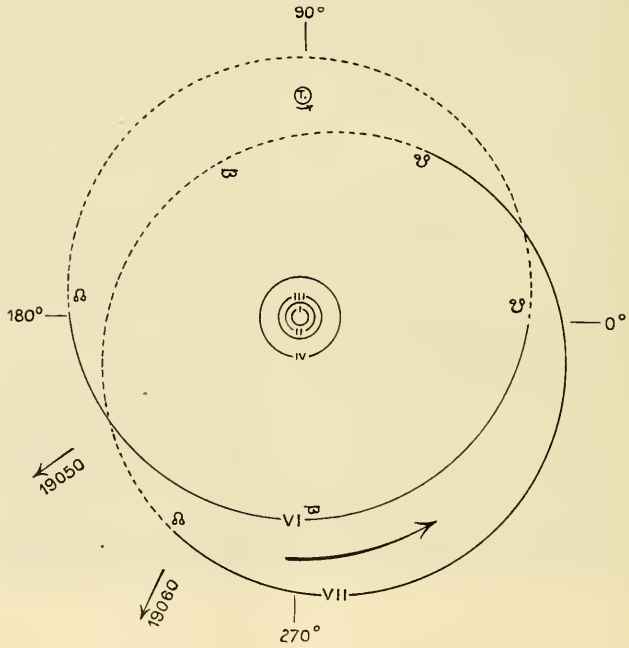
il n'en est pas de même de l'observation photographique qui, de 1899 à 1906, a enrichi le système solaire de cinq satellites nouveaux, trois à Jupiter et deux à Saturne.

Utilisant le magnifique télescope de Common ($0^m,92$) que l'Observa-

toire Lick doit à la générosité de M. Crossley et de miss Phœbe Hearst (*fig.* 81), l'astronome américain, Perrine, signala au commencement de décembre 1904 la présence d'un astre nouveau, d'ailleurs très faible (14e grandeur) sur les clichés qu'il avait obtenus les 3, 8, 9 et 10 de ce mois de la région voisine de Jupiter. On reconnut bientôt que c'était un nouveau satellite de cette planète, que l'astronome Aitken put dès le 25 décembre au moment de l'élongation observer directement avec la grande lunette ($0^m,91$) de l'Observatoire.

Peu après, le même astronome reconnut dans les clichés des 2, 3 et 4 janvier 1905 la preuve de l'existence dans cette même région du ciel d'un nouvel astre beaucoup plus faible et se déplaçant vers l'Est un peu plus rapidement que le VIe et qui était aussi un satellite de Jupiter.

Fig. 82.



Ces deux nouveaux compagnons de la planète sont, comme le précédent, de dimensions très faibles, le satellite VI ayant un diamètre équivalent en lumière d'environ 160^{km} et celui du VII étant de 50^{km},

et par suite à peu près égal à celui du satellite de Barnard (V). Mais, au lieu d'être, comme ce dernier, intérieurs au système des quatre satellites anciens, ils lui sont au contraire bien extérieurs (*fig.* 82); leurs distances à la planète, d'ailleurs assez peu différentes l'une de l'autre, étant en moyenne de 160 rayons de Jupiter, soit six fois plus grande que celle du dernier des satellites anciens. Autres détails intéressants :

1° Les orbites de ces deux satellites sont comme les cinq autres à peu près également inclinées sur l'écliptique; mais leurs plans, au lieu de se presque confondre avec ce dernier, sont très inclinés sur lui et, fait curieux, font avec lui sensiblement le même angle (30°) que le plan commun des anneaux et des satellites de Saturne;

2° Tandis que les six autres satellites se meuvent dans des orbites à très faible excentricité (0,007 au maximum pour Callisto), l'orbite du satellite VI a une excentricité relativement considérable, 0,16, et comparable à celle de Mercure.

D'autre part, les perturbations éprouvées par le satellite VI sous l'action du Soleil sont plus grandes et plus compliquées que celles de tous les autres satellites connus du système solaire. Ainsi cette action détermine un mouvement rétrograde du nœud de l'orbite de 1°,16 par an, qui lui fait faire le tour de l'écliptique en 310 ans.

Nous ajouterons que le satellite VI a pu être observé directement par M. Hammond (8 janvier 1905) avec l'équatorial de 0m,66 de l'Observatoire de Washington.

Satellite VIII. — Le 27 janvier 1908, M. Melotte, astronome à l'Observatoire de Greenwich, signalait l'existence, dans les clichés qu'il venait d'obtenir de la portion du ciel environnant Jupiter, d'un astre nouveau très faible (16e grandeur) qu'il supposa être un astéroïde et qu'il dénomma suivant la règle admise (CJ, 1908). Mais les observations ultérieures poursuivies assidûment à Greenwich pendant les mois de février et mars, ainsi que celles du Dr Wolf à Heidelberg et des astronomes de Lick, montrèrent que cet astre ne s'éloignait jamais de Jupiter et suggérèrent l'idée qu'il pouvait être un nouveau satellite de cette planète : elles fournirent à M. Crommelin des données suffisantes pour en calculer l'orbite relative. D'après cet astronome, ce satellite serait deux fois au moins plus éloigné de Jupiter

que les satellites VI et VII (450 fois le rayon de la planète) et sa révolution s'effectuerait en environ trois ans et demi.

Mais, fait absolument inattendu, son mouvement serait rétrograde (inclinaison 148°); au point de vue cosmogonique, cette anomalie a une importance considérable.

CHAPITRE IV.

SATELLITES DE SATURNE.

Les époques où Saturne est sans anneaux apparents, déjà remarquables par elles-mêmes, ont en outre un immense intérêt pour les facilités qu'elles ont données à l'étude de ce monde curieux; et voici pourquoi :

En raison de leur grand éloignement les satellites de Saturne nous apparaissent tous, sauf peut-être Titan et dans les grands instruments, absolument semblables à des étoiles et sans diamètre apparent sensible. Ce ne sont plus des disques éclairés, comme les anciens satellites de Jupiter; ce sont de véritables images stellaires, que rien ne distingue à première vue des étoiles faibles qui les avoisinent.

D'un autre côté, dans la majeure partie de l'année saturnienne, ces satellites, lorsqu'ils sont près de la planète, sont souvent éteints par l'éclat des anneaux ou bien disparaissent derrière leur vaste ensemble : s'ils en sont loin, ils s'éparpillent autour d'elle, par suite de la forte inclinaison de leurs orbites sur l'écliptique, au milieu des étoiles qui l'entourent et en tout semblables à elles.

Il faut donc, en général, pour qu'ils sollicitent l'attention, qu'ils nous apparaissent comme appartenant au plan des anneaux, ce qui est la caractéristique des époques dont nous parlons; et, c'est par suite à leurs environs qu'on aura la plus grande chance de les apercevoir la première fois.

Mais, même dans ces circonstances favorables, il fallait pour les découvrir que l'on disposât de lunettes plus lumineuses et plus nettes que celles de Galilée. Ce progrès fut réalisé par Huygens [1] et lui valut en 1655, alors que Saturne était à peu près sans anneaux (*fig.* 83), la découverte de Titan, le plus gros d'ailleurs des satellites de Saturne,

[1] La lunette d'Huygens avait $\frac{1}{4}^{m}$ de foyer et $0^{m},11$ d'ouverture : il la réduisait souvent à $0^{m},06$ par un diaphragme.

que Huygens jugea plus gros que le plus gros satellite de Jupiter, et dont l'éclat est de 8e grandeur.

Fig. 83.

Saturne sans anneaux avec Titan.

Seize ans plus tard, 1671 et 1672, et, par suite, sensiblement dans les mêmes conditions d'aspect de Saturne, mais avec des lunettes plus puissantes (33m et 45m de foyer) que celles d'Huygens, J.-D. Cassini découvrit deux nouveaux compagnons à Saturne, Japet et Rhéa, et à la période suivante (1684) cet illustre astronome nous en fit connaître deux autres, Téthys et Dioné.

Après cette brillante moisson on parut abandonner l'étude du système de Saturne. C'est seulement un siècle plus tard, lors de la période sans anneaux de 1789, que W. Herschel la reprit avec son télescope géant de 13m de foyer; deux nouveaux satellites, d'éclat beaucoup plus faible que les cinq déjà connus, Mimas et Encelade (1), vinrent alors s'ajouter à eux.

Cinquante ans plus tard (1848) et encore au cours d'une période sans anneaux, l'astronome américain G.-P. Bond, à l'aide de la lunette de 0m,36 d'ouverture qu'il venait de faire construire pour l'Observatoire d'Harvard College, et qui était alors l'une des plus puissantes, parvint à découvrir entre les deux anciens satellites extrêmes, Titan et Japet, un huitième satellite, Hypérion, plus faible encore que les précédents et dont l'éclat est de 13e grandeur.

---

(1) Les noms sous lesquels nous désignons les satellites de Saturne leur ont été donnés en 1847 par J. Herschel, afin d'éviter la confusion qui résultait de ce que certains astronomes les désignaient par l'ordre chronologique de leur découverte et d'autres par ordre de distance au Soleil.

Depuis Bond, l'observation directe la plus attentive n'a rien ajouté au monde déjà si riche que constitue cette magnifique planète. Mais tout récemment la photographie permit à W. Pickering de découvrir deux satellites nouveaux; nous en parlerons plus loin.

Relation entre les durées de révolution des quatre premiers satellites. — Il existe entre les quatre premiers satellites une relation analogue à celle qui lie les trois premiers satellites de Jupiter :

1° La durée de révolution du troisième satellite, Téthys, est double de celle du premier, Mimas; de même la durée de révolution du quatrième, Dioné, est double de celle du second, Encelade (cette remarque est due à W. Herschel);

2° Il y a le même rapport, 1, 45, entre les durées de révolution du second et du premier satellite qu'entre celles du quatrième et du troisième ([1]).

Il y a donc entre les quatre premiers satellites un lien spécial et plus étroit, qui n'existe pas pour les quatre derniers.

Quelques détails sur les satellites. Rétrogradation des nœuds de Titan. Bessel.

Les sept satellites intérieurs se meuvent sensiblement dans un même plan, celui de l'anneau, faisant avec le plan de l'orbite de la planète un angle d'environ 30° : l'orbite de Japet fait avec lui un angle moitié moindre.

Le plus connu de ces satellites est le plus gros, Titan, que Bessel a si soigneusement étudié en 1838; cet illustre astronome a démontré que, comme pour notre Lune, mais beaucoup plus lentement, les nœuds de son orbite rétrogradent constamment. Cette rétrogradation qui n'atteint que 24′29″ par siècle, à peu près 15″ par an et qui indique une rotation conique de l'axe de ce plan en 86,400 ans, est due à l'influence attractive de l'anneau de Saturne.

([1]) On conclut de ces relations, combinées avec le mouvement de la planète autour du Soleil, qu'au bout de 465j,18 ces quatre satellites se retrouvent, ainsi que l'a remarqué d'Arrest, dans les mêmes positions relatives aussi bien entre eux qu'avec le Soleil et la Planète.

Diamètre de Titan. Barnard. — Dans ces dernières années, et avec la lunette de $0^m,91$ d'ouverture de l'Observatoire Lick, M. Barnard a pu mesurer le diamètre apparent de Titan : il l'a trouvé égal à $0'',6$, le diamètre équatorial de Saturne étant de $17'',7$. Ceci correspond pour le satellite à un diamètre linéaire de 3650^{km}, sensiblement égal à ceux de la Lune et du premier satellite de Jupiter.

Combinées avec la masse 0,0002, ces dimensions conduisent à une densité (0,640) cinq fois plus forte que celle de Saturne et sensiblement égale à celle de notre Lune.

De même, dans le monde de Jupiter, Europe, son second satellite, a une densité deux fois plus forte que la sienne, tandis que la densité de la Lune n'est, au contraire, que les deux tiers de celle de la Terre.

Éclats des satellites. Leurs variations. — D'après W. Herschel l'éclat de Japet varierait périodiquement dans le cours d'une révolution; il serait maximum vers 70° de longitude et minimum en un point diamétralement opposé, et leur différence serait de trois grandeurs stellaires. Plus tard, Schrœter annonçait des variations analogues, quoique beaucoup plus faibles dans les éclats de Thétys, Dioné et Rhéa.

En vue de contrôler et préciser ces affirmations, M. E. Pickering fit à l'Observatoire Harvard, de 1877 à 1878, une série de mesures photométriques dans laquelle il comparait les éclats des satellites entre eux, et aussi à celui de Saturne pris comme étalon [1].

Voici les résultats obtenus par lui pour les éclats estimés en différences de grandeurs stellaires avec le globe de Saturne et les diamètres équivalents qui s'en déduisent, en supposant à la planète et à ses satellites le même albedo.

---

[1] Le 24 novembre 1878 il put comparer les huit satellites. Il observait aisément, dit-il, Hypérion, même par la pleine Lune.

Noms.	Différences avec le globe de Saturne.	Diamètre équivalent en diamètre de Saturne.	Diamètre équivalent en kilomètres.
Mimas.....	11,91	0,0042	470
Encelade.....	11,40	0,0052	594
Thétys.....	10,46	0,0081	916
Dioné.....	10,57	0,0077	871
Rhéa.....	9,88	0,0106	1197
Titan.....	8,50	0,0200	2259
Hypérion.....	12,81	0,0027	310
Japet.....	10,80	0,0069	783

Quant aux variations d'éclat, celui-ci a été trouvé pour tous, sauf pour le plus éloigné Japet, absolument indépendant de la position du satellite sur son orbite; l'éclat de ce dernier présente une variation périodique dont l'amplitude est d'une grandeur et demie, et dont le maximum ($11^{s},7$) et le minimum ($10^{s},3$) se produisent très approximativement aux deux points diamétralement opposés de l'orbite qu'avait indiqués W. Herschel (60° et 230° de longitude) (1).

Un satellite tournant nécessairement sur lui-même en même temps qu'il se transporte autour de la planète, on est tout naturellement porté à attribuer ces variations à la rotation elle-même. C'est ce que fit Herschel. Pour lui, Japet effectuerait, comme la Lune, sa rotation axiale dans le temps même de sa révolution et autour d'un axe sensiblement perpendiculaire au plan de son orbite, de façon à tourner toujours la même face vers Saturne; en outre, cet astre serait partagé en deux parties d'albedos différents.

Pour juger cette hypothèse, plaçons-nous dans un cas extrême devant donner la variation d'éclat maximum, celui où Japet serait partagé par un de ses méridiens en deux hémisphères, chacun superficiellement homogène, mais d'albedos différents, et supposons l'inclinaison du plan de l'orbite sur l'écliptique telle que l'axe de rotation puisse à un moment donné se confondre avec notre ligne de visée et à un autre lui être perpendiculaire; dans le premier cas, l'éclat sera constant et moyen, dans le second il sera variable et l'amplitude de sa variation sera maximum; d'après les mesures de Pickering, les deux éclats extrêmes devraient être dans le rapport de 4

(1) Pickering disposait de 20 nuits d'observation en 1877 et de 101 en 1878.

à 1. Ce sont des conditions d'inégalité déjà bien difficiles à admettre pour un corps dont on doit croire tout au moins la surface complètement solidifiée, et cependant les différences de constitution des diverses parties de cette surface devraient être bien plus grandes pour tout autre mode de distribution que celui de cette hypothèse simple.

Aussi a-t-on pensé à faire intervenir la forme forcément ellipsoïdale du satellite; mais alors l'albedo étant en moyenne le même sur toute sa surface, le rapport des diamètres polaire et équatorial devrait être voisin de 3 à 4, aplatissement hors de proportion avec tout ce que nous connaissons dans le système solaire.

En résumé, les variations d'éclat de Japet sont certaines, mais nous ne pouvons pas les expliquer.

IX. — Phénomènes des satellites de Saturne.

Périodes de durée de ces phénomènes. — Le système de Saturne comporte, comme celui de Jupiter, la série des phénomènes éclipses, passages et occultations, dont l'observation donne aussi périodiquement des positions exactes des satellites; mais il faut ici distinguer deux cas; celui des éclipses et celui des occultations ou passages.

Les circonstances les plus favorables à la production des éclipses seront réalisées lorsque la ligne Saturne-satellite passera par le Soleil ou en sera très voisine; le plan commun de l'anneau et des orbites des satellites passe alors par le Soleil.

Pour les occultations ou les passages, il convient, au contraire, que la ligne Saturne-satellite passe par la Terre; le plan commun aux satellites et à l'anneau passe alors par la Terre.

La périodicité de ces phénomènes est donc réglée par celle des époques où les anneaux disparaissent; quant à leur nombre et à la durée de leur production par chaque période, elles dépendent surtout de la plus ou moins grande proximité du satellite à la planète.

Prenons, par exemple, le sixième satellite Titan : l'intervalle pendant lequel, vers chaque nœud, ces phénomènes sont possibles, est d'environ 250 jours, pendant lesquels se produit, et symétriquement par rapport à la ligne des nœuds, une série ininterrompue de passages aux conjonctions inférieures, d'éclipses et d'occultations aux conjonctions supérieures; soient environ 48 de ces phénomènes suc-

cessivement à chaque nœud pendant à peu près un an, toutes les quinze années.

Pour le cinquième satellite Rhéa, la période correspondante, évidemment plus longue, est de deux ans pour chacun des nœuds, intervalle qui comprend environ 182 révolutions du satellite et, par suite, environ 550 de ces phénomènes.

Pour le quatrième satellite, Dioné, la période est de trois ans pour chaque nœud et contient à peu près 421 révolutions du satellite et 1263 phénomènes divers. Et ainsi de suite; de sorte que, pour Mimas, le satellite le plus rapproché de la planète, la période est de dix ans et demi, par intervalle de quinze ans et comprend 4750 phénomènes.

En résumé, en quinze ans, Titan reste quatorze ans sans donner lieu à aucune éclipse, tandis que Mimas en présente d'une façon ininterrompue pendant environ dix ans. Mais, en raison du faible éclat des satellites intérieurs à Titan, aussi bien que d'Hypérion qui le suit, les phénomènes de Titan sont les seuls qui intéressent les instruments de grandeur moyenne.

Quant à Japet, l'inclinaison particulière de son orbite et les inégalités de son mouvement le font ranger à part; pour lui, les éclipses et autres phénomènes sont excessivement rares, six environ par demi-année saturnienne, et, de plus, son faible éclat ne permet de les observer qu'avec des instruments très puissants : leur observation acquiert ainsi une importance considérable, et l'analyse que nous avons faite plus haut de celle de Barnard, à l'Observatoire Lick, montre tout l'intérêt qu'elles présentent.

Observations correspondantes. — L'observation systématique de ces phénomènes fut, pendant longtemps, impossible aux astronomes par suite du manque d'Éphémérides de prévision : les rares observations qui nous aient été léguées sont dues à un hasard heureux et concernent surtout Titan; depuis la première (éclipse), faite par J.-D. Cassini le 15 mars 1715 jusqu'en 1891, nous n'en comptons (éclipses et passages) que huit.

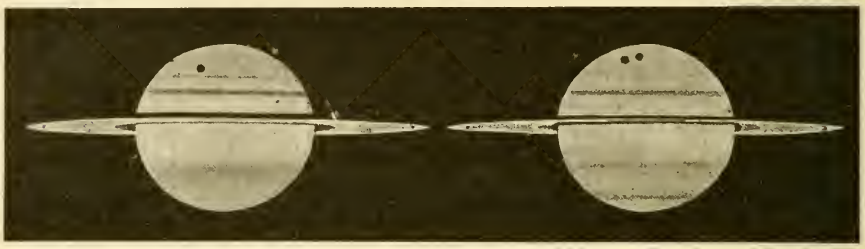
Pour les autres satellites, nous n'avons que deux observations d'éclipses de Téthys faites, l'une par le capitaine Jacob en 1853 et l'autre par Marth en 1863.

C'est à partir de la période de 1891-1892 que l'on commença à ob-

server régulièrement ces phénomènes, pour Titan d'abord, et bientôt pour les autres satellites. Certaines Éphémérides astronomiques entreprirent dans ce but la prédiction de leurs époques comme pour les satellites de Jupiter, et, sauf Hypérion, le plus petit d'entre eux, tous furent dès lors observés à ce point de vue par un ensemble d'astronomes, parmi lesquels je citerai H. Struve, Freemans, A.-S. Williams, W.-H. Maw, V. Nielsen, Terby, A. Mée et J. Guillaume.

Ajoutons d'ailleurs que l'ombre, qui accompagne toujours le satellite sous forme d'un petit disque noir (*fig.* 84), est bien plus facile à

Fig. 84.



Saturne en 1892.
24 février.

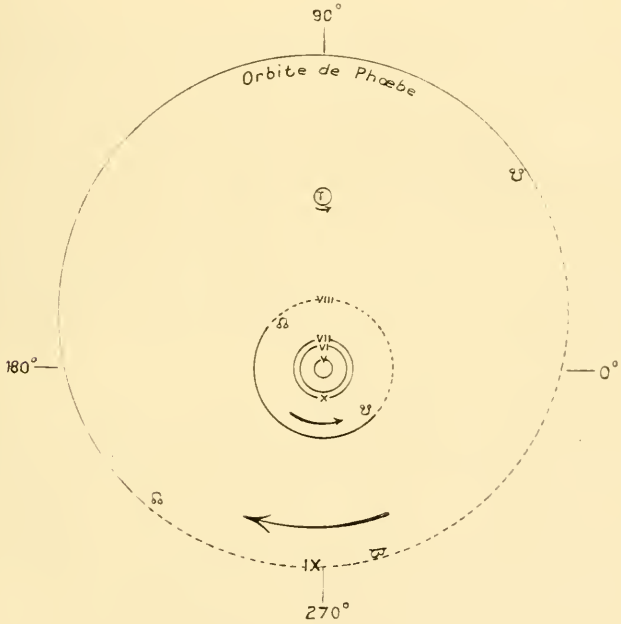
Titan et son ombre.
2 mars.

voir que celui-ci, si bien que les anciennes observations de passages se rapportent uniquement aux ombres, et que, d'autre part, la netteté comparative de la délimitation de cette ombre fait que c'est elle plutôt que le satellite lui-même qui sert aujourd'hui aux déterminations de position. Outre les matériaux que ces observations fournissent pour l'établissement de la théorie des satellites, l'ensemble de celles des passages de Titan a montré que les apparences sont ici les mêmes que pour Jupiter. Le satellite est lumineux sur les bords du disque de la planète, et il reste lumineux ou devient sombre suivant qu'il se projette sur une zone dont l'éclat est moindre ou plus grand que le sien. Le cas le plus général est qu'il devient sombre; en conséquence, pour Saturne comme pour Jupiter, les portions marginales du disque sont moins lumineuses que la portion médiane. C'est une nouvelle analogie des deux planètes maîtresses du système solaire.

Nouveaux satellites, IX *et* X.

1° Le 14 mars 1899, le service photographique de l'Observatoire Harvard, étudiant quatre clichés des environs de Saturne pris dans les nuits des 16, 17 et 18 août 1898 (durée de pose, 2 heures), à la succursale d'Arequipa (Pérou), par MM. W.-H. Pickering et Frost, avec le télescope Bruce de $0^{m},61$ d'ouverture, reconnaissait l'existence au voisinage de Saturne d'un astre mobile de 16e-17e grandeur, constituant un nouveau satellite de cette planète. Ce neuvième satellite est quatre fois plus éloigné de Saturne que Japet (*fig.* 85),

Fig. 85.



le dernier des anciens; on l'a appelé *Phœbé*. Il effectue sa révolution en à peu près 550 jours, suivant une orbite assez excentrique (0,21), mais dont l'inclinaison sur le plan de l'écliptique est d'environ 174°, de telle sorte que, anomalie très remarquable, le mouvement de ce satellite serait rétrograde. D'après W.-H. Pickering son diamètre serait d'environ 67^{km}.

2° Le 28 avril 1906, un télégramme d'Harvard annonçait que W.-H. Pickering venait de découvrir, sur des photographies données par le réfracteur Bruce d'Arequipa, un dixième satellite de Saturne encore plus faible que le précédent (17e-18e grandeur); son diamètre serait d'environ 61km. Il parcourrait, autour de Saturne, en 21 jours, et dans le sens direct, une orbite de grand axe très sensiblement égal à celui d'Hypérion (*fig.* 85) (dans cette figure et à cause de cette quasi-égalité, nous avons confondu leurs deux orbites en une seule, si bien qu'à cet égard on pourrait les appeler des *satellites jumeaux*), inclinée de 13° sur l'équateur de Saturne et d'une assez forte excentricité (0,23) qui lui fait couper celles d'Hypérion et de Titan.

Ce dixième satellite a été appelé *Thémis* (quoique ce nom appartienne déjà à une petite planète); il est de dimensions cinq fois moindres qu'Hypérion.

Comparaison des anomalies des systèmes de Jupiter et de Saturne. — Ces nouvelles découvertes rompent l'harmonie imposante que, jusqu'à elles, on avait constatée dans les systèmes planétaires.

Jusque-là, les satellites connus se succédaient à des distances les uns des autres presque régulièrement espacées; les nouveaux satellites les plus éloignés de Jupiter et de Saturne sont au contraire séparés de celui qui les précède dans l'ordre des distances par des intervalles considérables; il y a, semble-t-il, à partir d'une certaine distance, un hiatus, une sorte de lacune dans la distribution des satellites, lacune qui paraît correspondre à une époque critique dans le mode de formation de ces systèmes planétaires.

En même temps, ce qui accentue encore le caractère critique de cette époque, les satellites éloignés tournent autour de leurs planètes en sens contraire aux autres, ou en d'autres termes, leurs inclinaisons comptées dans le sens de leur mouvement sont voisines de 180°. Remarquons en outre que, dans le système Jovien, ce satellite rétrograde est précédé par deux autres directs, mais à forte inclinaison.

Un autre trait, commun à ces deux systèmes et qu'on ne rencontre pas dans les autres, est ce fait que, dans chacun, deux satellites intérieurs circulent autour de la planète dans des orbites d'à peu près même grand axe, VIe et VIIe de Jupiter, Thémis et Hypérion de Saturne, si bien que projetées sur le plan de l'orbite de la planète, ces deux orbites seraient presque en coïncidence.

Il nous paraît assez naturel de voir là, en petit, un exemple de ce que nous montre en grand l'amas planétaire des astéroïdes. Ces satellites, et ils ne sont probablement pas les seuls aux environs de cette distance moyenne à la planète, seraient des portions distinctes d'un même anneau satellitaire où il ne s'est point trouvé de masses assez puissantes, ou mieux, de causes de condensation assez énergiques, pour réunir en une seule toute la matière de l'anneau.

CHAPITRE V.

SATELLITES D'URANUS.

Premières découvertes de W. Herschel, six satellites. — Le grand Herschel revint à différentes époques sur cette planète qui avait commencé sa réputation. Le 11 janvier 1787, il lui découvre deux satellites et, bientôt après, il donne leurs durées de révolution, 8,5 jours et 13,5 jours.

En février et mars 1790, découverte de deux nouveaux satellites, dont l'un serait plus rapproché de la planète que le premier des anciens.

En février et mars 1794, découverte de deux autres satellites, dont un plus rapproché de la planète que le second des anciens et l'autre de tous le plus éloigné.

Le dernier Mémoire d'Herschel sur ce sujet est du 8 juin 1815 : il y perfectionne considérablement la théorie des deux anciens satellites et rectifie leurs durées de révolution.

Quant aux quatre satellites nouveaux, il avait rencontré tant de difficultés non seulement à les observer mais même à les apercevoir, il fut si souvent indécis sur leur identification au milieu des petites étoiles entourant la planète, qu'il n'a pu déterminer directement leurs durées de révolution. Les valeurs qu'il en donne sont calculées au moyen de la troisième loi de Képler, en partant d'hypothèses faites sur leurs distances relatives à la planète et à un satellite ancien.

John Herschel. — Le fils de ce grand astronome, John Herschel, a repris pendant les années 1828, 1830, 1831 et 1832, l'étude du système d'Uranus avec ses meilleurs télescopes, mais jamais il n'a pu voir et reconnaître que les deux satellites anciens, auxquels il donne comme durées de révolution les valeurs suivantes : 8 jours $16^h 56^m 31^s,3$ et 13 jours $11^h 7^m 12^s,6$.

Lamont. — Quelques années après, en 1837, Lamont, de Munich, entreprit aussi une série de recherches sur le monde d'Uranus à l'aide d'un objectif de $0^m,27$ d'ouverture. Les durées de révolution qu'il obtint pour les deux anciens satellites diffèrent fort peu des précédentes; mais, ce en quoi il se distingue de J. Herschel, c'est qu'il dit *avoir vu et observé le sixième satellite* dans la soirée du 1er octobre 1837.

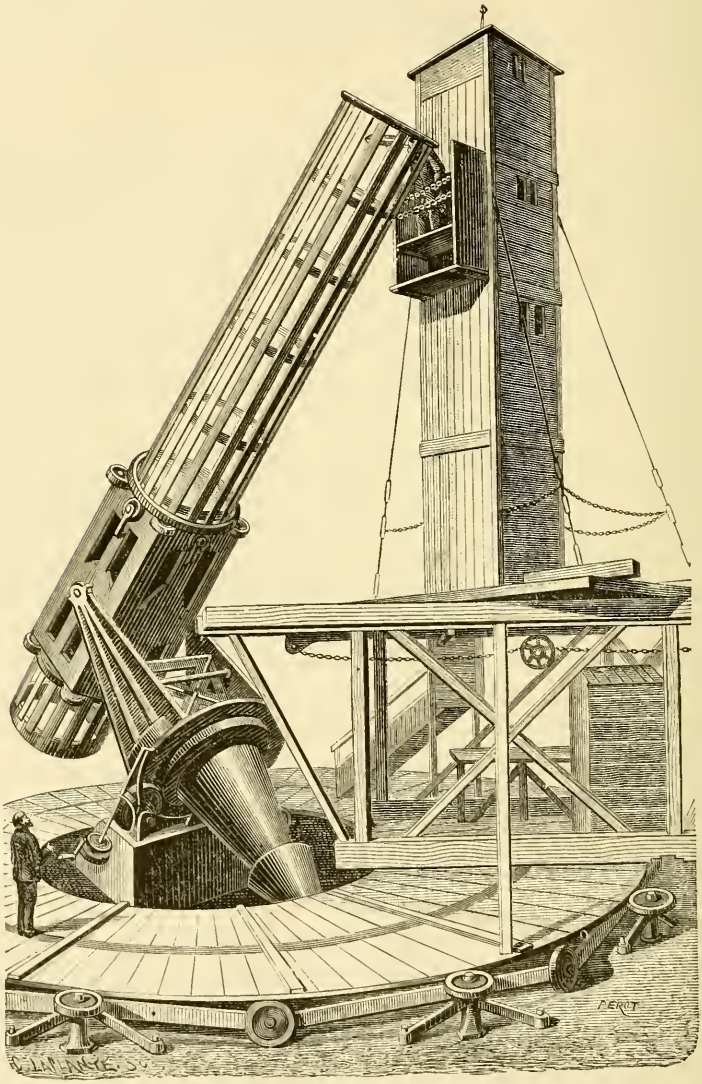
Composition réelle du monde d'Uranus. Lassell. — La composition réelle du monde d'Uranus restait donc incertaine, sa description exacte était un problème des plus intéressants à résoudre : ce fut l'œuvre de Lassell, riche brasseur de Liverpool, déjà célèbre par la découverte du satellite de Neptune.

Lassell appartenait à cette classe d'observateurs qui, comme Huygens, W. Herschel et de notre temps les frères Henry et Common, « créèrent eux-mêmes leur matériel instrumental, l'adaptant par leur ingéniosité et leur ténacité aux besoins à remplir, suivant la voie qu'ils se sont tracée ». Dès 1820 il s'adonna à la construction des télescopes : aussi habile dans la partie mécanique que dans le travail optique, il réalisa en 1844-1845 la construction d'un télescope de $0^m,61$ d'ouverture et de 6^m de distance focale et par suite très lumineux; mais, ce que n'avaient fait ni W. Herschel ni lord Rosse, il le monta équatorialement, immense avantage pour les recherches d'astres inconnus. C'est avec lui qu'il découvrit le satellite de Neptune (10 octobre 1846), ajouta en même temps que P. Bond un huitième satellite à Saturne et trancha la question des satellites d'Uranus. Voici dans quelles circonstances :

Dans l'automne de 1847, il indiqua un satellite intérieur aux deux premiers d'Herschel, et auquel il attribua une durée de révolution de 2 jours environ; à peu près à la même époque (8 octobre 1847), O. Struve, avec le grand réfracteur de Poulkova ($0^m,41$), annonçait l'existence d'un autre satellite, intérieur aussi aux deux premiers d'Herschel et d'une durée de révolution d'environ 4 jours. Mais aucun d'eux ne retrouvait les quatre satellites nouveaux d'Herschel et le problème se compliquait de plus en plus. Après une longue et délicate recherche, Lassell en eut enfin la clef le 24 octobre 1851. Les satellites, que Struve et lui avaient vus en 1847, existaient bien réellement tous deux, avec des durées de révolution peu différentes de

celles qu'ils leur avaient assignées; quant aux quatre satellites d'Her-

Fig. 86.



Télescope de Lassell.

schel, il ne put les voir ni en Angleterre ni à Malte, où il se transporta pour avoir une atmosphère plus transparente, soit avec le télescope

de 0^m61, soit avec un autre d'ouverture double ($1^m,22$) qu'il construisit ensuite (*fig.* 86).

Pour lui (1851), le monde d'Uranus comprend les quatre satellites suivants :

		j h m s
Ariel,	avec une révolution de.....	2.12.29.20,7
Umbriel,	»	4. 3.28. 7,3
Titania,	»	8.16.56.25,6
Obéron,	»	13.11. 6.55,4

Titania et Obéron sont les *deux anciens* d'Herschel; ils sont les plus brillants et sont à peu près de même éclat; Ariel aurait un éclat moitié moindre et Umbriel serait plus faible encore.

Vogel à Bothkamp (1871) avec un objectif de $0^m,30$, Newcomb et Holden à Washington (1873-1874) avec l'équatorial de $0^m,66$, et tout récemment les astronomes des Observatoires Lick et Yerkes avec leurs instruments plus puissants encore, confirmèrent les conclusions de Lassell qui sont aujourd'hui adoptées par tous.

Quant aux éclats de ces astres, en voici, d'après Holden, Newcomb et Aitken (équatorial de $0^m,91$ de Lick) et E. Pickering (photographie), leurs valeurs estimées en grandeurs stellaires :

	Holden.	Aitken.	Pickering.
Ariel.....	16	14,5 à 15	»
Umbriel.....	16 à 17	15 à 16	»
Titania.....	13 à 14	13	14,25
Obéron.....	14	»	14,41

Ces nombres font comprendre aisément toute la difficulté que soulevait la solution du problème des satellites d'Uranus et en même temps les tâtonnements inévitables qui l'ont précédée.

En adoptant pour Uranus le diamètre de 58860^{km}, Pickering déduit de ses mesures les valeurs suivantes pour les diamètres des deux satellites les plus brillants :

Titania.....	942^{km}
Obéron.....	875^{km}

Avec le diamètre que donne pour Uranus le Tableau de la page 5 et qui est généralement admis, ces dimensions deviennent :

Titania.....	1290^{km}
Obéron.....	1200^{km}

D'un autre côté, en combinant par la formule de Stampfer ces diamètres avec les grandeurs stellaires données par Holden, on trouve pour ceux des deux autres satellites :

Ariel	581^{km}
Umbriel	400^{km}

Mouvement rétrograde des satellites d'Uranus. — Ce monde d'Uranus est très remarquable par un fait signalé en 1797 avec grande insistance par W. Herschel sur les deux anciens satellites, confirmé par J. Herschel en 1828 et vérifié plus tard sur ceux de Lassell [1].

Les satellites d'Uranus circulent autour de la planète en rétrogradant; en d'autres termes, *ces satellites décrivent, par des mouvements dirigés de l'Est à l'Ouest, les arcs septentrionaux compris entre les nœuds ascendants et les nœuds descendants de leurs orbites.*

Ou encore, *le plan commun aux orbites des satellites d'Uranus, sensiblement perpendiculaire au plan de l'orbite de la planète, fait avec lui un angle un peu supérieur à* 90°.

Jusqu'à Uranus (sauf les satellites VIII de Jupiter et IX de Saturne, tous deux les plus éloignés dans leur système) tous les satellites circulent autour de la planète génératrice sensiblement dans un même plan, celui de l'équateur de la planète, et dans le sens (direct) de la rotation axiale de celle-ci.

Pour Uranus, ses satellites connus, tous voisins de la planète, circulent aussi autour d'elle dans un même plan, mais en sens rétrograde ; il en résulte comme conséquence infiniment probable que : *la rotation d'Uranus se fait en sens rétrograde.* C'est, en effet, ce qu'ont récemment vérifié les observations de Brenner et les beaux travaux spectroscopiques de M. Deslandres.

---

[1] Il est intéressant de signaler que cette constatation si importante du grand Herschel a été complètement négligée par Laplace dans la célèbre Note VII, Conclusion à l'*Exposition du système du Monde,* où il développe son hypothèse sur la formation du système solaire.

CHAPITRE VI.

SATELLITE DE NEPTUNE.

Lassell. — Dans les trois derniers mois de l'année 1846, Lassell avait remarqué à quatre reprises différentes, près de la planète Neptune, une petite étoile qui semblait changer de position par rapport à elle; mais ces observations, trop distantes les unes des autres (10 octobre, 11 et 30 novembre, 3 décembre), n'apportaient aucune certitude. Au commencement de juillet suivant, il reprit cette étude et, dès le 3 août 1847, il fut en mesure d'affirmer l'existence de ce satellite.

Quelques mois plus tard (25 octobre), W.-C. Bond confirmait l'assertion de Lassell, mais annonçait en même temps un second satellite, plus faible et plus distant que celui de Lassell et que, d'ailleurs, Lassell crut revoir le 13 août 1850. Mais une étude ultérieure des environs de Neptune l'amena bientôt à nier l'existence de ce second compagnon et la conclusion finale de ce célèbre astronome est que Neptune ne possède qu'un seul satellite.

Le mouvement de ce satellite est rétrograde. — L'orbite de ce satellite a été calculée avec beaucoup de soin par Newcomb. Comme pour les satellites d'Uranus *son mouvement est rétrograde,* et, même, il s'éloigne beaucoup plus du mouvement direct puisque l'inclinaison de son plan sur celui de l'écliptique est de 144°.

Dimensions. — Ses dimensions nous sont surtout connues par les mesures photométriques de Pickering; si l'on admet avec lui la valeur 7,9 pour grandeur stellaire de Neptune, celle de son compagnon serait de 13,8. En adoptant aussi pour la planète le diamètre de 55760^{km}, qu'il en donne, celui du satellite serait de 3630^{km}; avec le diamètre adopté pour Neptune dans le Tableau de la page 5, il descendrait à 3147^{km}.

Ces nombres diffèrent d'ailleurs assez peu; et l'on doit en conclure que le diamètre du satellite de Neptune est au moins triple de celui de Titania, le plus gros des satellites d'Uranus, et sensiblement égal à celui de notre Lune.

Anomalie de son éclat. — Le satellite de Neptune se différencie de la plupart des autres corps de notre système solaire par un caractère particulier. Ainsi que l'a constaté W.-H. Pickering en 1900, la lumière qu'il nous envoie est beaucoup plus actinique que celle de la planète elle-même; à l'observation directe la différence des grandeurs des deux astres est, en effet, de 6^{gr}, tandis que la détermination photographique la réduit à 5^{gr}, l'image photographique du satellite serait donc, d'après la formule de Pogson ([1]), deux fois et demie plus brillante que l'image visuelle. Il n'en est pas de même pour la planète génératrice dont les grandeurs visuelle et photographique sont égales.

On doit forcément en conclure que la constitution superficielle du satellite diffère notablement de celle de la planète. Mais l'explication de ce fait ne peut, dans l'état actuel de nos connaissances, être que purement hypothétique.

L'albedo considérable (0,604) de la planète porte à croire qu'elle est entourée d'une atmosphère assez épaisse; sa composition serait-elle de telle nature qu'elle absorbât les rayons actiniques (ultra-violets), le satellite fonctionnant au contraire comme un radiateur absolu; ou inversement, l'atmosphère de la planète étant de constitution normale, le satellite ne serait-il point encore entièrement formé et aurait-il conservé un pouvoir lumineux propre qui, s'ajoutant à celui qu'il reçoit du Soleil, l'enrichirait d'ondes à longueurs courtes et par suite à vibrations rapides. Il nous est impossible de décider entre ces deux hypothèses. Quoi qu'il en soit il y a là pour nous une nouvelle indication d'un mode spécial de formation pour les membres du système solaire qui sont à sa limite extérieure.

([1]) *Voir* Ch. André, *Astronomie stellaire,* 1re Partie, p. 114.

CHAPITRE VII.

RÉSUMÉ.

Le Tableau qui suit résume toutes les données numériques certaines que nous ayons sur les satellites.

SATELLITES.

A. — Anciennes planètes.

Nom, auteur et date de la découverte.	Inclinaison du plan de l'orbite sur l'équateur planétaire.	Excentricité.	Grand axe rapporté au diamètre équatorial de la planète.	Révolution sidérale en jours moyens.	Masse rapportée à celle de la planète.
		Terre.			
La Lune	3°.40′	0.055	60.0	27j. 7h.43m.11s,5	0,012552
		Mars.			
Phobos, *Asaph Hall* 17 Août 1877.	1.42	0.022	2.7	0. 7.39.13,9	»
Deimos, *Asaph Hall* 11 Août 1877.		0.003	6,7	1. 6.17.54,9	»
		Jupiter.			
V. *Barnard* 9 Septembre 1892.		0,005	2.6	0.11.57.22,7	»
Io, *Galilée* 7 Janvier 1610.		»	5,9	1.18.27.33,5	0,000017
Europe, *S. Marius* 8 Janvier 1610.	2. 0	»	9,4	3.13.13.42,1	0,000023
Ganymède, *Galilée* 7 Janvier 1610.		0,001	15,1	7. 3.42.33,4	0,000089
Callisto, *Galilée* 7 Janvier 1610.		0,007	26,5	16.16.32.11,2	0,000043
VI. *Perrine* 3 Décembre 1904. Découvert photographiquement.	30. 0	0,16	160	251	»
VII. *Perrine* 2 Janvier 1905. Découvert photographiquement.		0,02	167	267	»
VIII. *Melotte* 3 Mars 1908. Découvert photographiquement.	148	»	450	3ans,5	»

Nom, auteur et date de la découverte.	Inclinaison du plan de l'orbite sur l'équateur planétaire	Excentricité.	Grand axe rapporté au diamètre equatorial de la planète.	Révolution sidérale en jours moyens.	Masse rapportee a celle de la planète.
Saturne.					
MIMAS, *W. Herschel* .. .. 18 Juillet 1789.	° ′	0,019	3,1	j h m s 0.22.37. 5,3	<0,000001
ENCELADE, *W. Herschel* ..... 29 Août 1789.		0,005	3,9	1. 8.53. 6,8	<0,000001
TÉTHYS, *J.-D. Cassini*..... 21 Mars 1684.	2.18	»	4,9	1.21.18.26.2	0,000001
DIONÉ, *J.-D. Cassini*..... 21 Mars 1684.		0,002	6.3	2.17.41. 9,5	0,000002
RHÉA, *J.-D. Cassini*..... 23 Décembre 1672.		0,001	8,7	4.12.25.12.2	0,000004
TITAN, *Huygens*... ..... 25 Mars 1655.	1.57	0,029	20,2	15.22.41.27,0	0,000213
THÉMIS X, *W.-H. Pickering*.... 16 Avril 1904. Découvert photographiquement.	13.24	0,23	24,2	20.20.24	»
HYPÉRION, *G.-P. Bond*..... 16 Septembre 1648.	1.32	0,129	24,5	21. 6.38.23,9	»
JAPET, *J.-D. Cassini* ..... 25 Octobre 1671.	7.14	0.028	58,9	79. 7.56.23	0,000005
PHŒBÉ, IX, *W.-H. Pickering*.. 16 Août 1898. Découvert photographiquement.	149.23	0.22	215	550.10.34	»
B. — PLANÈTES MODERNES (1).					
Uranus.					
ARIEL, *Lassell*..... 24 Octobre 1851.	° ′ 97.58	0,020	7,0	j h m s 2.12.29.21,1	Comprises entre 0,000012 et 0,000050
UMBRIEL, *Lassell*..... 24 Octobre 1851.	98.21	0,010	9,9	4. 3.27.37,2	
TITANIA, *W. Herschel* ..... 11 Janvier 1787.	97.47	0,001	16,1	8.16.56.29,5	
OBÉRON, *W. Herschel*.. ..... 11 Janvier 1787.	97.54	0.004	21,5	13.11. 7. 6,4	
Neptune.					
UN SATELLITE, *Lassell*..... 10 Octobre 1846.	142.40	0,007	14,7	5.21. 2.38,4	»

(1) Leurs équateurs étant inconnus les inclinaisons sont rapportées à l'Écliptique.

L'examen de ce Tableau conduit à quelques remarques intéressantes :

1° En général, ces satellites décrivent des orbites dont les plans coïncident sensiblement avec l'équateur de la planète et qui diffèrent fort peu de cercles.

2° Notre satellite se distingue des autres par une excentricité plus forte, une masse relative plus considérable et une grande distance à la planète.

3° Le premier satellite de Mars, Phobos, met un temps beaucoup moindre (moins de la moitié) à effectuer sa révolution autour de la planète que la durée de la rotation de celle-ci. C'est un fait tout à fait anormal dans le système solaire où, pour tous les satellites connus jusqu'à celui-là, la durée de révolution était supérieure à celle de la rotation de la planète.

4° Les trois satellites les plus récents de Jupiter, VI, VII et VIII, sont bien loin au delà des anciens, dont ils sont séparés par un intervalle considérable formant comme un vide dans le système de Jupiter; les orbites de VI et VII, dont les grands axes sont peu différents (rapport de 1,13 à 1,00), ont à peu près la même inclinaison d'ailleurs considérable 30°, sur le plan de l'orbite de Jupiter, mais leurs excentricités sont très différentes, 0,16 et 0,36.

5° Le satellite VIII de Jupiter et le satellite IX de Saturne, Phœbé, tous deux les plus éloignés de la planète dans leur système, effectuent leur révolution autour d'elle en sens rétrograde et par suite en sens inverse de la rotation axiale de celle-ci.

Il y a là une objection sérieuse à l'énoncé théorique jusqu'alors universellement admis que les satellites des planètes doivent effectuer leurs translations autour d'elles dans le sens même de leurs rotations, absolument comme les planètes décrivent leurs orbites dans le sens de la rotation du Soleil.

Il y a, en outre, lieu de remarquer qu'il existe entre ces satellites nouveaux et celui qui les précède immédiatement un intervalle considérable, absolument anormal par rapport à l'ordre de succession des anciens.

Les exceptions que nous venons de signaler dans les systèmes de Jupiter et de Saturne deviennent une règle pour les deux planètes qui les suivent; l'inclinaison des plans des orbites des satellites d'Uranus par rapport à l'écliptique est un peu supérieure à 90°, et

pour le satellite de Neptune elle atteint 142°; les satellites de ces deux planètes effectuent donc aussi leurs révolutions en sens inverse de celui de la rotation solaire.

Quoi qu'il en soit, ces faits montrent qu'il est impossible de conserver aujourd'hui, sans modifications ou additions, l'hypothèse si séduisante qui, pour l'illustre Laplace, résumait la formation du système solaire. Leur discussion fera l'objet de la troisième Partie de cet Ouvrage.

CHAPITRE VIII.

MASSES DES PLANÈTES ET DE LEURS SATELLITES.

I. — Masses des planètes.

Comment les astronomes ont-ils pu déterminer la masse des planètes et, par suite, les peser par rapport à l'une d'entre elles? Telle est la question que nous nous proposons actuellement de résoudre.

Planètes ayant un satellite. — Lorsque la planète a un satellite, la réponse est assez simple et le procédé employé est une conséquence directe des lois de Newton, d'après lesquelles l'attraction, exercée sur un point extérieur par une sphère composée de couches concentriques homogènes, est la même que si toute la masse de la sphère était réunie à son centre : or, nous pouvons, tout au moins avec une assez forte approximation, supposer que telle est la composition des différentes planètes et de leurs satellites et, par conséquent, à ce point de vue remplacer tous ces corps par des points matériels de masses différentes, s'attirant en raison directe de ces masses et en raison inverse des carrés de leurs distances.

Ceci posé, considérons le système formé par le Soleil, une planète et un de ses satellites :

En même temps que la planète attire le satellite, celui-ci attire la planète vers lui, de telle sorte que, a' désignant leur distance, c'est-à-dire le rayon de l'orbite du satellite, m la masse de la planète, m_1 celle du satellite, leur mouvement relatif est déterminé par une force proportionnelle à

$$\frac{m + m_1}{a'^2};$$

de même, le mouvement relatif du satellite et du Soleil, a désignant la distance commune (dans une première approximation bien suffi-

sante ici) de la planète ou de son satellite au Soleil, et M la masse du Soleil, est déterminé par une force proportionnelle à

$$\frac{M + m_1}{a^2}.$$

Ces deux forces, agissant sur une même masse, celle du satellite, sont proportionnelles aux accélérations qu'elles lui impriment; si l'on connaissait ces accélérations le problème serait résolu. Or, rien n'est plus facile : on peut, en effet, considérer comme circulaires le mouvement du satellite autour de la planète aussi bien que celui de la planète autour du Soleil et, d'autre part, confondre le mouvement du satellite autour du Soleil avec celui de la planète elle-même : d'après les lois d'Huygens, les accélérations de chute du satellite vers la planète et vers le Soleil sont proportionnelles à

$$\frac{2\pi a'}{T'^2} \quad \text{et} \quad \frac{2\pi a}{T^2},$$

T et T′ étant les durées de révolution du satellite autour de la planète et de celle-ci autour du Soleil.

On a donc

$$\frac{\dfrac{m + m_1}{a'^2}}{\dfrac{M + m_1}{a^2}} = \frac{\dfrac{2\pi a'}{T'^2}}{\dfrac{2\pi a}{T^2}}$$

ou

$$\frac{m + m_1}{M + m_1} = \left(\frac{T}{T'}\right)^2 \left(\frac{a'}{a}\right)^3,$$

formules dans lesquelles on suppose évidemment a et a' rapportées à la même unité de longueur et T et T′ à la même unité de temps.

Nous ramenons ainsi la mesure des masses planétaires à des mesures de temps et de longueurs.

Cette expression peut d'ailleurs être bien simplifiée. Son premier membre équivaut, en effet, au suivant :

$$\frac{\dfrac{m}{M} + \dfrac{m_1}{M}}{1 + \dfrac{m_1}{M}}.$$

Or, il est clair que le rapport $\frac{m_1}{M}$ de la masse du satellite à celle du

Soleil est négligeable devant l'unité et aussi devant $\frac{m}{M}$, de sorte que l'on aura, pour rapport de la masse de la planète à celle du Soleil, l'expression

$$\frac{m}{M} = \left(\frac{T}{T'}\right)^2 \left(\frac{a'}{a}\right)^3.$$

La détermination de la masse d'une planète dépend donc surtout, les temps T et T' étant toujours suffisamment connus, de celle des distances a et a' ou mieux du rayon de l'orbite de la planète dont a' dépend et par suite en dernière analyse de la distance du Soleil à la Terre en fonction de laquelle s'expriment tous les grands axes des orbites planétaires.

Il s'ensuit donc, et ceci est à remarquer, que les nombres qui expriment les rapports des masses des planètes au Soleil changent avec la valeur adoptée pour la parallaxe du Soleil. On s'explique ainsi une fois de plus tout l'intérêt qu'attachent les astronomes à une détermination aussi exacte que possible de cette constante astronomique fondamentale.

Lorsqu'une planète a plusieurs satellites, chacun d'eux donne une valeur de sa masse : on a ainsi un certain nombre de déterminations indépendantes, que l'on combine d'après les règles du calcul des probabilités, de façon à obtenir une valeur la plus exacte possible.

Planètes n'ayant pas de satellites. Vénus et Mercure. — Dans ce cas, le problème est plus compliqué, sa solution repose sur les principes suivants : si la planète, Mercure par exemple, était seule avec le Soleil, elle décrirait autour de lui une ellipse déterminée ; mais, dès qu'une autre planète s'introduit dans le système, l'attraction qu'elle exerce sur Mercure empêche celui-ci d'occuper la position qu'il aurait eue dans le premier cas ; sa position actuelle diffère à chaque instant de sa position elliptique, et ces écarts sont proportionnels aux masses des deux planètes. Toutes les planètes, si elles sont assez proches de Mercure et ont une masse assez grande, ont sur lui des actions analogues : et, à chaque instant, la position observée de la planète doit différer de sa position elliptique d'une quantité donnée par l'ensemble de tous ces écarts individuels. Or, l'illustre Laplace a montré comment on pouvait calculer chacun d'eux, et par suite leur ensemble, au moyen des éléments des orbites

de chacune des planètes; dans ces expressions théoriques, les masses planétaires entrent évidemment en facteurs.

On a donc, entre les écarts observés et les écarts théoriques, une série d'égalités où les masses entrent comme inconnues; chacune de ces égalités, dont le nombre est d'ailleurs supérieur à celui des inconnues, constitue une *équation de condition* à laquelle les masses inconnues doivent satisfaire, et le problème à résoudre est de savoir si l'on peut donner à ces masses des valeurs telles que les équations soient vérifiées dans les limites des erreurs d'observation. Tel est le procédé qu'a employé Le Verrier pour obtenir les masses des quatre premières planètes : il est certainement moins précis que le premier, car les quantités connues qui entrent dans les équations sont déterminées moins exactement et sont beaucoup plus sous la dépendance des erreurs d'observation; d'autre part, il y a à peine deux siècles que nos méthodes d'observation ont peu à peu acquis une précision satisfaisante et, pendant ce court intervalle, les écarts résultant de ces causes perturbatrices sont relativement petits.

Jupiter. Captation des comètes. Énoncé général. — Mais il est un cas, où cette méthode des perturbations est presque l'égale de celle des satellites, c'est celui de *la captation des comètes par Jupiter*. La masse de cette planète étant à elle seule deux fois et demie la somme des masses de toutes les autres (le millième de celle du Soleil) en même temps que sa distance au Soleil est considérable, il peut arriver, si l'astre troublé vient passer près d'elle, que son action sur lui devienne prédominante et l'emporte sur celle du Soleil. Cette prépondérance, Jupiter l'exerce notamment sur les comètes qui passent à sa portée.

Comète de Lexell. — L'un des exemples les plus remarquables est celui de la comète de 1770, dite *comète de Lexell,* du nom de l'astronome qui en démontra la périodicité.

Lexell avait montré, à l'aide des observations qu'on en fit de juin à octobre 1770, qu'elle devait décrire une orbite elliptique nettement accusée, avec une période excessivement courte de $5\frac{2}{3}$ ans; mais alors, pourquoi ne l'avait-on jamais vue jusque-là à l'un de ses si fréquents retours au voisinage du Soleil? Lexell lui-même a donné la réponse, en montrant qu'en 1769 la comète, alors inconnue, était

passée fort près de Jupiter de façon à être 580 fois plus rapprochée de cet astre que du Soleil. L'action de Jupiter devenue prépondérante avait modifié la durée de sa révolution, qui auparavant était beaucoup plus grande, et en avait fait une comète à courte période.

Mais, fait bien curieux encore, cette comète de Lexell on ne l'a pas revue depuis 1770 : après cette courte apparition elle semble avoir disparu complètement. La raison en est qu'en 1779 la comète s'est encore trouvée très près de Jupiter, beaucoup plus près même qu'en 1769, puisque très probablement elle a alors traversé le système jovien entre la planète et ses satellites. Il en est résulté une perturbation considérable et telle que la vitesse de la comète par rapport au Soleil a été assez grande pour transformer son orbite en une autre très allongée ou peut-être parabolique.

Le petit nombre des observations de cette comète dont on disposait ne permit pas d'ailleurs d'en déduire des données relatives à la masse de Jupiter.

Comète de Winnecke. — Heureusement son cas n'est pas unique : d'autres comètes ont été ainsi saisies par Jupiter et ont pu être ensuite suivies assidûment. Telle est la comète de Winnecke, dont la période est de 5,8 ans et qui éprouve du fait de Jupiter des perturbations considérables. On les a calculées avec soin et l'on en a déduit la valeur $\frac{1}{1047,2}$ pour la masse de Jupiter : de même l'étude des mouvements de la comète de Faye a conduit au nombre $\frac{1}{1047,2}$ identique à celui que Schur a déduit de l'ensemble des quatre anciens satellites.

Emploi des astéroïdes. — Ceux des astéroïdes dont l'orbite est très excentrique, peuvent parfois s'approcher de Jupiter à une distance huit ou dix fois moindre que celle qui les sépare alors du Soleil et subir de la part de cette planète de fortes perturbations. Nous citerons en particulier l'astéroïde Thétys (17) dont les perturbations ont été fort bien étudiées et ont donné le nombre $\frac{1}{1047,5}$ pour la masse de Jupiter.

Remarque. — L'accord des valeurs auxquelles conduisent, pour la masse de Jupiter, son attraction sur des corps aussi denses que les satellites et les astéroïdes et au contraire sur des corps d'une ténuité

extrême comme les comètes, est un fait très important. Il constitue l'une des belles vérifications expérimentales de la loi de Newton. *L'attraction de l'unité de masse de Jupiter sur l'unité de masse de l'un quelconque de ces corps est toujours rigoureusement la même.*

Masse de la Terre en kilogrammes. — Il nous reste à exprimer toutes ces masses au moyen de celle que nous prenons pour unité à la surface de la Terre; il suffit évidemment, pour cela, de savoir combien la masse de la Terre contient de fois l'unité choisie. Tel était le but du travail par lequel Cavendish réussit non seulement à mettre en évidence l'attraction infinitésimale exercée par une sphère de plomb pesant 158^{kg} sur une petite balle de plomb placée à son voisinage, mais aussi de la mesurer. En comparant cette attraction au poids de la balle, qui représente à fort peu près l'action attractive de la Terre, il put dire combien la masse de la Terre renferme de fois la masse de la sphère de plomb et par conséquent combien la Terre pèse de kilogrammes. Ce nombre est sensiblement $158^{kg} \times 10^{23}$; il est tellement énorme qu'il ne représente rien à l'esprit. Aussi on l'exprime autrement : on connaît le volume de la Terre et, supposant une distribution fictive uniforme de la matière dans toute son étendue, on peut de la combinaison de ces deux nombres obtenir la densité moyenne de notre globe; on la trouve ainsi égale à 5,38, c'est-à-dire qu'un centimètre cube de cette matière fictive pèse 5,38 fois le poids d'un centimètre cube d'eau ([1]).

II. — Masses des satellites.

1° *Jupiter. Travaux de Laplace.* — La même méthode des perturbations, qui nous a fourni les masses de Vénus et de Mercure, a servi aussi à Laplace pour déterminer les masses des satellites de Jupiter. Théoriquement ces satellites décrivent des orbites elliptiques suivant les lois de Képler ; mais, leurs attractions mutuelles perturbent ces mouvements. Mettre en évidence ces perturbations, les discuter, obtenir les équations de condition dont nous avons parlé et les

([1]) Newton avait (*Principia*, liv. III, prop. X) déjà indiqué que la densité moyenne de la Terre devait être comprise entre 5 et 6. Depuis Cavendish, de nombreux travaux ont été faits sur ce sujet en vue d'obtenir plus d'exactitude dans cette mesure. Mais leur étude serait en dehors du programme de cet Ouvrage.

résoudre fut l'une des plus belles œuvres de l'illustre géomètre. Il trouva ainsi pour ces masses les valeurs suivantes rapportées à celle de Jupiter prise pour unité :

Io.....	$\frac{1}{59000}$	Ganymède.....	$\frac{1}{11000}$
Europe.....	$\frac{1}{43000}$	Callisto.....	$\frac{1}{23000}$

La masse du plus gros satellite, Ganymède, serait ainsi le trente-septième de celle de la Terre, soit un peu plus du double de celle de la Lune.

2° *Saturne.* — La même méthode est évidemment applicable aux satellites de Saturne : mais en raison de leur petitesse leurs attractions réciproques sont très faibles, sauf celles exercées par Titan ; et comme leurs observations précises sont peu nombreuses et assez récentes, il est bien difficile de mettre en évidence les perturbations qui en résultent ; aussi en général les valeurs données pour les masses des satellites sont-elles très incertaines. Mais pour ce gros satellite, Titan, les nombres doivent inspirer plus de confiance. Son action sur Hypérion, satellite le plus voisin de lui, est, en effet, assez forte pour faire rétrograder le grand axe de son orbite d'environ 20° par an, rétrogradation presque de même valeur que celle de la ligne des nœuds de la Lune. On en a conclu que la masse de Titan est le $\frac{1}{4700}$ de celle de Saturne, soit environ une fois et demie celle de la Lune.

Anneaux de Saturne. — C'est encore l'observation des petits mouvements de rotation, imprimés par l'attraction des anneaux, au grand axe des orbites des satellites qui a permis d'avoir une idée de la masse totale des anneaux de Saturne. Elle serait le $\frac{1}{620}$ de la masse de la planète.

3° *Mars, Uranus et Neptune.* — On ne connaît rien de précis sur les masses de leurs satellites ; pour ceux des deux premières planètes, on dispose de trop peu d'observations pour avoir une connaissance exacte de leurs mouvements, et pour celui de Neptune, qui est unique, nous n'avons actuellement aucun moyen d'en déterminer la masse.

En résumé, nous pouvons affirmer que les satellites les plus gros

des planètes ont des masses égales ou fort peu supérieures à celle de la Lune.

III. — Masse de la Lune.

Il nous reste à montrer comment on a déterminé la masse de notre satellite; on peut le faire tout aussi bien par la méthode générale des perturbations que par un assez grand nombre de procédés spéciaux. Nous nous bornerons aux plus intéressants de ces derniers.

1° *Par le mouvement de nutation de l'axe de la Terre.* — L'attraction du Soleil sur la Terre n'a pas seulement pour effet de lui faire décrire autour de cet astre une orbite déterminée avec une vitesse variant d'après une loi fixe, mais cette planète, comme d'ailleurs toutes les autres, étant de forme ellipsoïdale, et l'action solaire s'exerçant dans une direction excentrique sur les renflements extérieurs à la sphère théorique, qu'on peut considérer comme formant le corps même de la Terre, cette action détermine en outre un déplacement angulaire continu de son axe de rotation : la Lune, à cause de sa proximité, produit un déplacement analogue et l'ensemble de ces deux mouvements constitue ce qu'Hipparque a appelé la *précession des équinoxes.* L'axe de rotation de la Terre ne conserve pas une direction fixe dans l'espace; il décrit d'un mouvement uniforme, en environ 26000 ans, une surface conique autour de l'axe de l'écliptique, si bien que les pôles célestes se trouvent successivement dans les différentes constellations traversées par un petit cercle de 23°,5 de rayon. Mais là n'est point le seul effet de la Lune. Le plan de son orbite faisant le tour entier de l'écliptique en 18 $\frac{2}{3}$ ans, son action sur l'axe de rotation de la Terre varie dans la même période par suite des changements périodiques des situations relatives des deux astres. Ces variations sont faibles évidemment; aussi a-t-il fallu, pour les découvrir, toute l'habileté et le génie de Bradley; néanmoins elles aboutissent à un mouvement de balancement, de *nutation,* du pôle qui le déplace de 18″,5 en 18 $\frac{2}{3}$ ans. Il en résulte, dans les positions des étoiles par rapport au pôle vrai, des changements périodiques dont la grandeur dépend de la masse de la Lune et peut servir à la déterminer.

Cette méthode, indiquée par d'Alembert et perfectionnée par La-

place, a donné à Peters et à Le Verrier les valeurs

$$\frac{1}{81,24} \quad \text{et} \quad \frac{1}{81,84}$$

pour la masse de notre satellite rapportée à celle de la Terre.

Il peut, au premier abord, paraître paradoxal que l'on ait recours à l'observation des étoiles pour déterminer l'un des éléments importants de la constitution physique de la Lune; mais cette anomalie apparente tombe d'elle-même si l'on pense que ces étoiles ne sont ici que des repères servant à fixer les positions successives de l'axe de rotation de la Terre.

2° *Par l'inégalité lunaire de la Terre.* — Dans le système formé par le Soleil, la Terre et la Lune, ces deux derniers astres ne sont point indépendants l'un de l'autre; ni la Terre ne décrit autour du Soleil, ni la Lune autour de la Terre, une ellipse suivant les lois de Képler. La Terre et la Lune forment un ensemble dont toutes les parties sont soumises à l'action attractive du Soleil. Or, on sait que, dans le mouvement de cet ensemble, celui du centre de gravité G est le même que si, supprimant la Terre T et la Lune L, on y transportait leurs masses et on lui supposait appliquée une force égale à la résultante des attractions TA et LB du Soleil S sur la Terre et sur la Lune transportées en G parallèlement à elles-mêmes. D'autre part, comme la distance GT n'est qu'une fort minime fraction, $\frac{1}{32400}$, de ST, on peut, dans une première approximation fort suffisante ici, admettre que le point G se meut comme s'il était à chaque instant attiré par le Soleil en raison inverse du carré de la distance GS; ceci revient à dire que le point G, et non la Terre, décrit une ellipse autour du Soleil; de même le rayon vecteur LT peut être considéré comme tournant autour du point G suivant la même loi que s'il se mouvait autour de la Terre supposée fixe. Dès lors le rayon vecteur ST du Soleil ne coïncidera avec la droite SG qu'aux deux syzygies : dans tous les autres cas il faudra, pour avoir la direction ST, corriger la direction SG qu'on obtient par les lois du mouvement elliptique, d'un petit angle à chaque instant variable avec les positions respectives des trois astres, et qui atteindra évidemment sa plus grande valeur lorsque l'angle STL sera droit, c'est-à-dire aux quadratures.

Mais pour nous, le mouvement de la Terre n'est autre que le mou-

vement apparent du Soleil sur lequel cette perturbation se reproduit. Le Soleil sera donc, en dehors des syzygies, en avance ou en retard sur sa position normale du petit angle ci-dessus, et l'écart maximum aura lieu tous les $14^j,5$ aux quadratures de la Lune. Or, la discussion minutieuse des observations du Soleil montre que, parmi les inégalités de son mouvement, il en est une dont le maximum correspond, en effet, à ces époques et dont la valeur est de $6'',4$. La connaissance de cet angle donne le rapport de TG à TS et par suite de TG à LG, c'est-à-dire celui de la masse de la Lune à celle de la Terre. L'application de cette méthode faite en 1828 par Airy a donné pour ce rapport la valeur

$$\frac{1}{80,4}.$$

Il peut encore paraître étrange que l'on déduise la masse de la Lune d'observations faites sur le Soleil : mais il faut remarquer que le Soleil n'est ici que l'indicateur des mouvements de la Terre qui subit directement l'influence troublante de la Lune.

3° *Par le phénomène des marées.* — Les eaux de l'océan sont soumises à des oscillations dues à une série d'ondes dont l'amplitude varie périodiquement avec les positions relatives du Soleil, de la Lune et de la Terre : c'est ce qui constitue sur les côtes le phénomène des marées. Newton a montré le premier que ces oscillations étaient dues aux actions attractives du Soleil et de la Lune ; au commencement du XIXe siècle Laplace a, dans un important Mémoire, fait une théorie complète de ces phénomènes, séparé la part qui y revient à chacun des deux astres et donné des formules qui permettent d'obtenir la masse de la Lune par leur comparaison avec les hauteurs successives du niveau de la mer dans le cours de la période. En même temps, sur sa demande, le gouvernement organisait en 1806 à Brest, où les marées sont considérables, une série d'observations de ce phénomène qu'on devait continuer au moins pendant une période du mouvement des nœuds de l'orbite lunaire, période après laquelle il compara à la théorie les observations, au nombre de plus de six mille, faites de 1807 à 1825.

En 1862 Lubbock entreprit une discussion analogue pour les marées à Londres.

On semblait donc en droit d'attendre de ces données une valeur

exacte de la masse cherchée. Malheureusement, d'une part, au voisinage des côtes le phénomène des marées se complique et n'est pas aussi simple que l'indique la théorie de Laplace et, d'autre part, aux époques que nous avons citées les procédés d'observation et de mesure des marées n'avaient pas toute la précision désirable : aussi les nombres trouvés par Laplace $\left(\frac{1}{70}\right)$ et Lubbock $\left(\frac{1}{67}\right)$ sont-ils assez éloignés de la vérité.

Depuis, la théorie des marées a été beaucoup perfectionnée, les appareils d'observation rendus plus précis et continus, si bien que l'on peut espérer pouvoir dans peu d'années reprendre avec succès l'application de cette méthode qui offre l'intérêt tout particulier de déterminer l'action attractive de la Lune par des effets qui se passent autour de nous et que nous pouvons mesurer avec nos instruments ordinaires.

Nombre conclu. — En conclusion nous dirons que, de l'ensemble de toutes les meilleurs déterminations, il résulte que la valeur la plus probable de la masse de la Lune est de

$$\frac{1}{81}$$

de la masse de la Terre.

TROISIÈME PARTIE.

FORMATION DU SYSTÈME PLANÉTAIRE.

CHAPITRE I.

LAPLACE ET SES SUCCESSEURS.

Comme conclusions aux études qui précèdent, nous chercherons s'il est possible, dans l'état actuel de la Science, d'obtenir un mode rationnel de formation pour l'ensemble du système planétaire.

De l'avis général, la base la plus solide sur laquelle nous puissions nous appuyer est encore l'hypothèse de l'illustre Laplace, dont nous reproduisons les parties essentielles.

I. — Laplace.

Hypothèse de Laplace. — « On a, pour remonter à la cause des mouvements primitifs du système planétaire, les phénomènes suivants [1] : les mouvements des planètes dans le même sens et à peu près dans un même plan; les mouvements des satellites dans le même sens que ceux des planètes; les mouvements de rotation de ces différents corps et du Soleil, dans le même sens que leurs mouvements de projection et dans des plans peu différents; le peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites.

» Voyons s'il est possible de s'élever à leur véritable cause.

» Quelle que soit sa nature, puisqu'elle a produit ou dirigé les mouvements des planètes, il faut qu'elle ait embrassé tous ces corps, et,

[1] Laplace néglige complètement le fait si important signalé en 1797 avec insistance par W. Herschell : les deux anciens satellites d'Uranus trouvés par cet astronome effectuent *leurs révolutions en sens rétrograde.*

vu la distance prodigieuse qui les sépare, elle ne peut avoir été qu'un fluide d'une immense étendue. Pour leur avoir donné, dans le même sens, un mouvement presque circulaire autour du Soleil, il faut que ce fluide ait environné cet astre comme une atmosphère. La considération des mouvements planétaires nous conduit donc à penser qu'en vertu d'une chaleur excessive, l'atmosphère du Soleil s'est primitivement étendue au delà des orbes de toutes les planètes, et qu'elle s'est resserrée successivement jusqu'à ses limites actuelles.

» Dans l'état primitif où nous supposons le Soleil, il ressemblait aux nébuleuses que le télescope nous montre composées d'un noyau plus ou moins brillant, entouré d'une nébulosité qui, en se condensant à la surface du noyau, le transforme en étoile. Si l'on conçoit, par analogie, toutes les étoiles formées de cette manière, on peut imaginer leur état antérieur de nébulosité, précédé lui-même par d'autres états dans lesquels la matière nébuleuse était de plus en plus diffuse, le noyau étant de moins en moins lumineux. On arrive ainsi, en remontant aussi loin qu'il est possible, à une nébulosité tellement diffuse qu'on pourrait à peine en soupçonner l'existence.

» Mais comment l'atmosphère solaire a-t-elle déterminé les mouvements de rotation et de révolution des planètes et des satellites? Si ces corps avaient pénétré profondément dans cette atmosphère, sa résistance les aurait fait tomber sur le Soleil; on peut donc conjecturer que les planètes ont été formées à ces limites successives par la condensation des zones de vapeurs qu'elle a dû, en se refroidissant, abandonner dans le plan de son équateur.

» L'atmosphère du Soleil ne peut pas s'étendre indéfiniment; sa limite est le point où la force centrifuge due à son mouvement de rotation balance la pesanteur; or, à mesure que le refroidissement resserre l'atmosphère et condense à la surface de l'astre les molécules qui en sont voisines, le mouvement de rotation augmente; car, en vertu du principe des aires, la somme des aires décrites par le rayon vecteur de chaque molécule du Soleil et de son atmosphère, et projetées sur le plan de son équateur, étant toujours la même, la rotation doit être plus prompte quand ces molécules se rapprochent du centre du Soleil. La force centrifuge due à ce mouvement devenant ainsi plus grande, le point où la pesanteur lui est égale est plus près de ce centre; en supposant donc, ce qu'il est naturel d'admettre, que l'atmo-

sphère s'est étendue, à une époque quelconque, jusqu'à sa limite, elle a dû, en se refroidissant, abandonner les molécules situées à cette limite et aux limites successives produites par l'accroissement de la rotation du Soleil. Ces molécules abandonnées ont continué de circuler autour de cet astre, puisque leur force centrifuge était balancée par leur pesanteur. Mais, cette égalité n'ayant point lieu par rapport aux molécules atmosphériques placées sur les parallèles à l'équateur solaire, celles-ci se sont rapprochées, par leur pesanteur, de l'atmosphère à mesure qu'elles se condensaient et elles n'ont cessé de lui appartenir qu'autant que, par ce mouvement, elles se sont rapprochées de cet équateur.

» Considérons maintenant les zones de vapeur successivement abandonnées. Ces zones ont dû, selon toute vraisemblance, former, par leur condensation et l'attraction mutuelle de leurs molécules, divers anneaux concentriques de vapeur circulant autour du Soleil. Le frottement mutuel des molécules de chaque anneau a dû accélérer les unes et retarder les autres, jusqu'à ce qu'elles aient acquis un même mouvement angulaire; ainsi les vitesses réelles des molécules plus éloignées du centre de l'astre ont été plus grandes. La cause suivante a dû contribuer encore à cette différence de vitesse. Les molécules les plus distantes du Soleil et qui, par les effets du refroidissement et de la condensation, s'en sont rapprochées pour former la partie supérieure de l'anneau ont toujours décrit des aires proportionnelles aux temps, puisque la force centrale dont elles étaient animées a été constamment dirigée vers cet astre; or, cette constance des aires exige un accroissement de vitesse à mesure qu'elles s'en sont rapprochées. On voit que la même cause a dû diminuer la vitesse des molécules, qui se sont élevées vers l'anneau pour former sa partie inférieure.

» Si toutes les molécules d'un anneau de vapeurs continuaient de se condenser sans se désunir, elles formeraient à la longue un anneau liquide ou solide, mais la régularité que cette formation exige dans toutes les parties de l'anneau et dans leur refroidissement a dû rendre ce phénomène extrêmement rare. Aussi le système solaire n'en offre-t-il qu'un seul exemple, celui des anneaux de Saturne. Presque toujours chaque anneau de vapeurs a dû se rompre en plusieurs masses qui, mues avec des vitesses très peu différentes, ont continué de circuler à la même distance autour du Soleil. Ces masses on dû prendre des formes sphéroïdiques, avec un mouvement de rotation dirigé dans

le sens de leur révolution, puisque leurs molécules inférieures avaient moins de vitesse réelle que les supérieures; elles ont donc formé autant de planètes à l'état de vapeur. Mais si l'une d'elles a été assez puissante pour réunir successivement par son attraction toutes les autres autour de son centre, l'anneau de vapeurs aura été ainsi transformé dans une seule masse sphéroïdique de vapeurs circulant autour du Soleil, avec une rotation dirigée dans le sens de sa révolution. Ce dernier cas a été le plus commun; cependant le système solaire nous offre le premier cas dans les quatre petites planètes qui se meuvent entre Jupiter et Mars, à moins qu'on ne suppose, avec M. Olbers, qu'elles formaient primitivement une seule planète, qu'une forte explosion a divisée en plusieurs parties animées de vitesses différentes.

» Maintenant, si nous suivons les changements qu'un refroidissement ultérieur a dû produire dans les planètes en vapeurs dont nous venons de concevoir la formation, nous verrons naître au centre de chacune d'elles un noyau s'accroissant sans cesse par la condensation de l'atmosphère qui l'environne. Dans cet état, la planète ressemblait parfaitement au Soleil à l'état de nébuleuse où nous venons de le considérer; le refroidissement a donc dû produire, aux diverses limites de son atmosphère, des phénomènes semblables à ceux que nous avons décrits, c'est-à-dire des anneaux et des satellites circulant autour de son centre, dans le sens de son mouvement de rotation et tournant dans le même sens sur eux-mêmes. La distribution régulière de la masse des anneaux de Saturne autour de son centre et dans le plan de son équateur résulte naturellement de cette hypothèse, et sans elle devient inexplicable; ces anneaux me paraissent être des preuves toujours subsistantes de l'extension primitive de l'atmosphère de Saturne et de ses retraites successives. Ainsi les phénomènes singuliers du peu d'excentricité des orbes des planètes et des satellites, du peu d'inclinaison de ces orbes à l'équateur solaire et de l'identité du sens des mouvements de rotation et de révolution de tous ces corps avec celui du Soleil, découlent de l'hypothèse que nous proposons et lui donnent une grande vraisemblance. Si le système solaire s'était formé avec une parfaite régularité, les orbites des corps qui le composent seraient des cercles dont les plans, ainsi que ceux des divers équateurs et des anneaux, coïncideraient avec le plan de l'équateur solaire. Mais on conçoit que les variétés sans nombre qui ont dû

exister dans la température et la densité des diverses parties de ces grandes masses ont produit les excentricités de leurs orbites, et les déviations de leurs mouvements du plan de cet équateur. »

Émise à l'époque où le système solaire était moins connu qu'aujourd'hui et où l'on pouvait admettre que dans ce système tous les mouvements, tout aussi bien de révolution que de rotation, s'effectuaient dans le même sens, le sens direct, la théorie de Laplace prend cette universalité comme base fondamentale et, sous une forme magistrale et d'une admirable simplicité, elle en est pour ainsi dire la traduction matérielle; mais les découvertes ultérieures ont montré qu'une pareille universalité n'existait pas; elle est donc devenue insuffisante.

Et la question est de savoir si l'on peut, à la fois, la modifier et la compléter de façon à obtenir une synthèse qui rende compte de toutes les particularités que nous avons constatées dans le système solaire.

Les travaux les plus importants que l'étude de cette question a suscités sont dus à MM. E. Roche, G. Darwin, C. Wolf, H. Faye, F. Stratton.

Mais, avant de les analyser et de les discuter, il convient de rappeler, en un court résumé, l'ensemble de ces particularités :

1° Les deux planètes extrêmes, Uranus et Neptune, effectuent leur mouvement de rotation dans le sens rétrograde, entraînant avec elles des révolutions de même sens pour leurs satellites.

2° Dans chacun des systèmes de Saturne et de Jupiter, le satellite le plus éloigné effectue sa révolution en sens rétrograde, tandis que tous les autres circulent autour de la planète en sens direct. Ces deux satellites sont à une distance de leur planète tout à fait anormale.

3° La moitié intérieure des anneaux de Saturne, ainsi que le premier satellite de Mars, Phobos, circulent autour de la planète en un temps plus court que la rotation de celle-ci.

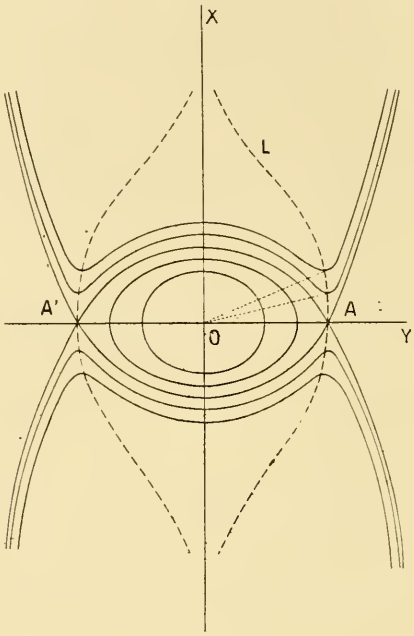
4° Jupiter est la seule planète dont on puisse dire, comme le voudrait la théorie de Laplace, que le plan de son équateur est celui de son orbite.

II. — Travaux de E. Roche.

Atmosphère. Surfaces de niveau. Surface limite. Surface libre. — E. Roche s'est donné pour but de préciser la théorie de Laplace et

d'en dégager toutes les conséquences qu'elle peut renfermer [1]. Il suppose avec lui l'existence, à l'intérieur de la nébuleuse, d'une condensation centrale dont l'attraction est prédominante; la matière extrê-

Fig. 87.



mement raréfiée qui compose les régions périphériques se comporte comme un fluide rare, compressible et élastique, en un mot comme

---

[1] On a le droit d'être étonné que E. Roche ait, comme Laplace, cru ne pas devoir tenir compte des circonstances singulières du mouvement des deux satellites d'Uranus, dits *anciens*.

Pour Laplace, malgré la haute autorité du grand Herschel, cette exception à la règle générale pouvait paraître douteuse; mais, à l'époque de Roche, le fait était certain. Voici, en effet, ce que dit à ce sujet J. Herschel dans son *Traité d'Astronomie* (Traduction française de Cournot 1834, p. 352) : « A part les deux satellites intérieurs de Saturne, ceux d'Uranus sont les objets de notre système solaire les plus difficiles à apercevoir. L'existence de deux d'entre eux est hors de doute, et l'on soupçonne celle de quatre autres. Ces deux satellites offrent des particularités remarquables et tout à fait inattendues. Contrairement à l'analogie qui s'observe dans tout le système solaire, aussi bien pour les satellites que pour les planètes principales, les plans de leurs orbites sont *presque perpendiculaires à l'écliptique*, ayant sur ce plan une inclinaison de 101° 2'; et *leurs mouvements sont rétrogrades*.

une atmosphère; chaque molécule est entraînée dans le mouvement de rotation d'ensemble et pèse vers le centre en vertu de l'attraction du noyau central.

Roche étudie les conditions d'équilibre de cette atmosphère et détermine la forme de ses surfaces de niveau; abstraction faite de l'action du fluide sur lui-même, ces surfaces sont déterminées par la condition qu'en chacun de leurs points la résultante des forces agissantes, force centrifuge et pesanteur, soit normale à la surface. On trouve ainsi une famille de surfaces de révolution autour de l'axe de rotation OX, dont nous donnons les sections méridiennes (*fig.* 87).

Pour que la surface de niveau soit une surface d'équilibre, il faut, en outre, qu'une molécule abandonnée en un de ses points pèse vers l'intérieur; il faut donc que la composante de la force centrifuge suivant la direction de la pesanteur soit inférieure à celle-ci; le lieu des points où elle lui est égale est une surface L, « *surface limite,* parce que l'atmosphère ne saurait la dépasser ».

La *surface limite* L, dont la section méridienne est représentée en traits discontinus sur la figure 87, enferme les seules portions des surfaces de niveau qui répondent à la condition ci-dessus et qui, par suite, pourraient être considérées comme formes d'équilibre de l'atmosphère.

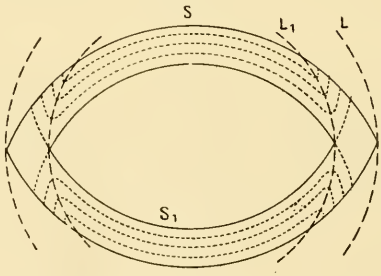
En allant du centre vers l'extérieur, nous rencontrons d'abord des surfaces fermées se rapprochant de la forme ellipsoïdale dont l'aplatissement va en augmentant sans pouvoir dépasser la valeur $\frac{1}{2}$ qu'il atteint pour une surface S (*fig.* 88) d'un caractère particulier et tout à fait remarquable, qui sépare les surfaces de niveau fermées de celles plus extérieures qui ont au contraire des branches infinies. La courbe génératrice de cette surface S possède à l'équateur un point double A où les deux tangentes font entre elles un angle de 120°; en tournant autour de OX, cette courbe engendre une surface qui offre elle-même une arête saillante tout le long de l'équateur; c'est la ligne de jonction de la partie fermée de cette surface avec ses deux nappes illimitées, caractérisée par ce fait qu'en chacun de ses points la force centrifuge fait exactement équilibre à la pesanteur. C'est pourquoi elle contient le cercle équatorial de la surface limite L et cette arête saillante constitue la limite équatoriale au delà de laquelle, d'après Laplace, les points de l'équateur ne font plus partie de l'atmosphère solaire.

Extérieurement à la surface S, les courbes de niveau n'enveloppent plus de toutes parts celles qui les précèdent, mais elles s'ouvrent à l'équateur pour se développer en deux nappes infinies.

Pour une valeur déterminée de la vitesse angulaire de rotation, il existe une surface de niveau telle que S, au delà de laquelle l'équilibre ne peut subsister. C'est cette surface S que Roche appelle la *surface libre.*

Anneaux de Laplace. — L'atmosphère solaire est, en outre de sa rotation, soumise à l'influence continue et progressive du refroidissement causé par l'espace froid qui l'entoure. En raison de l'extrême ténuité de la nébuleuse dans ses portions extérieures, ce refroidissement agit jusqu'à une grande profondeur relative à l'intérieur de la nébuleuse, et son effet direct est de provoquer la chute, vers la condensation centrale, d'une portion de ses parties périphériques sans altérer sensiblement ses dimensions; en réalité, nous devons considérer son effet comme produisant une raréfraction progressive des portions extérieures de la nébuleuse sans que cependant le rayon de celle-ci change sensiblement, et d'augmenter peu à peu

Fig. 88.



la quantité de matière dans les portions intérieures de cette nébuleuse.

Au point de vue mécanique, il en résulte donc une diminution progressive du moment d'inertie de la masse totale et, par conséquent, une augmentation progressive de la vitesse angulaire de rotation. Par suite de cette augmentation de vitesse angulaire, la limite équatoriale diminue, la surface libre se rapproche du centre en restant semblable à elle-même.

Ces principes posés, pour nous rendre compte des transformations

que l'augmentation de vitesse entraîne dans la nébuleuse, considérons deux états différents caractérisés par deux vitesses de rotation différentes ω et ω_1 auxquelles correspondent respectivement les surfaces limites L et L_1 et les surfaces libres S et S_1 (*fig.* 88).

Toute la portion de l'atmosphère en dehors de L_1 échappe à la nébuleuse, et la matière entre S et S_1 n'est plus en équilibre, « la couche fluide qui se trouve en dehors de S_1 descend des pôles vers l'équateur en coulant le long des surfaces de niveau et s'échappe, comme par une ouverture, par l'arête saillante que nous avons signalée ».

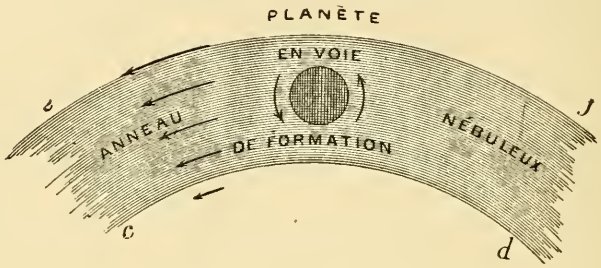
Le refroidissement continuant, il semblerait que cet écoulement de matière le long de l'arête équatoriale saillante devrait être continu. Il ne l'est pas. La nébuleuse abandonne dans le voisinage du plan de son équateur, par le procédé que nous avons vu plus haut, les parties superficielles de son atmosphère qui sont les plus froides ; celles-ci s'écoulent vers l'équateur et, ne se portant plus vers le centre, ne contribuent plus à la condensation centrale. La diminution du moment d'inertie cesse, la vitesse de rotation devient constante, l'équilibre se rétablit et la nébuleuse solaire entre dans une nouvelle période de stabilité. Mais, dès lors et par suite du refroidissement, le mouvement de la matière périphérique vers le centre recommence, la vitesse de rotation se remet à croître et peut atteindre une valeur suffisante pour qu'il y ait de nouveau instabilité

On conçoit que la même série de phénomènes puisse se reproduire à des intervalles plus ou moins distants et l'on comprend par ce mécanisme l'abandon, dans le plan équatorial de la nébuleuse, d'une succession d'anneaux de Laplace.

Formation des planètes. — « Considérons une des zones délaissées dans le plan de l'équateur. Si les divers points matériels dont elle est formée ont décrit primitivement un grand cercle, ils conserveront leur vitesse telle que leur poids est constamment équilibré par la force centrifuge. Ils continueront donc à circuler comme auparavant. L'ensemble de ces points constitue un cercle matériel se mouvant comme s'il était solide. Une série de cercles pareils successivement délaissés forme un anneau de largeur finie, circulant autour du centre commun, mais désormais indépendant du Soleil, et, par suite, étranger aux modifications que le refroidissement apportera à la rotation solaire. Cet anneau nébuleux, agglomération de parti-

cules, se mouvant sur des orbites à peu près circulaires, continuant à se condenser plus ou moins régulièrement, s'est rompu et finalement aggloméré, au moins partiellement, en masses sphéroï-

Fig. 89.



dales, à l'état fluide, qui bientôt se sont réunies autour de la plus puissante d'entre elles pour former une masse sphéroïdale de vapeurs circulant autour du Soleil à peu près comme l'anneau primitif; telles furent, selon Laplace, les planètes à l'origine, tournant dans des orbes peu excentriques et tournant aussi sur elles-mêmes dans le sens de la révolution en vertu de l'excès de vitesse des molécules supérieures relativement aux inférieures (*fig.* 89). »

Cette conclusion sur le sens de rotation de la planète formée suppose expressément que, en vertu du frottement réciproque des molécules, chaque anneau laissé dans la zone équatoriale a fini par tourner d'une seule pièce, comme s'il était solide.

D'après cette formation, les distances auxquelles circulent actuellement les planètes nous donnent sensiblement le rayon de la nébuleuse aux époques d'instabilité. Or ce rayon est celui de l'équateur de la *surface limite* L dont les points sont caractérisés par ce fait que la force centrifuge équilibre exactement la pesanteur. Si donc M est la masse totale, a le rayon de l'anneau abandonné, T le temps qu'il met à effectuer une révolution complète, nous avons l'égalité

$$\frac{M}{a^2} = \frac{4\pi^2 a}{T^2},$$

d'où

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{M}{4\pi^2} = \text{const.},$$

c'est-à-dire l'expression de la troisième loi de Képler. « Cet accord

entre une loi fondamentale du système du monde et l'hypothèse de Laplace ne constitue pas une démonstration de cette hypothèse, mais c'est une condition à laquelle toute théorie cosmogonique doit satisfaire. »

Formation des satellites. — Lorsqu'un anneau s'est rompu, puis transformé en une masse sphéroïdale, celle-ci a dû prendre un mouvement de rotation autour d'un axe à peu près perpendiculaire au plan de l'orbite. Elle est donc comparable à la nébuleuse solaire, mais en de moindres proportions. Il faut toutefois tenir compte d'une influence nouvelle : l'attraction du Soleil sur la planète à l'état de vapeur. « Sous cette action, l'atmosphère planétaire s'allonge dans le sens du rayon qui joint son centre au Soleil. De cet allongement résulte une tendance de la nébuleuse à tourner constamment vers le Soleil les mêmes points de sa surface. Ainsi s'établit l'égalité entre les mouvements de rotation et de translation de la planète, égalité qui, pour une raison analogue, a lieu aujourd'hui chez la Lune et qui a dû se rencontrer chez toutes les planètes dans la première phase de leur existence. »

L'action perturbatrice du Soleil est d'autant plus grande que le volume de la nébuleuse planétaire est plus grand, si bien que celui-ci diminuant, par suite de sa condensation, cette action n'a plus été « suffisante pour maintenir l'égalité des deux mouvements. La vitesse de rotation de la nébuleuse planétaire se met à croître ; la nébuleuse planétaire redevient assimilable à la nébuleuse solaire et elle peut dès lors abandonner des anneaux secondaires, origine des satellites de la planète ».

De cette conception résulte que, par suite de l'attraction solaire, toutes les planètes quel qu'ait été leur mouvement de rotation sur elle-même au moment de l'agglomération de l'anneau ont fini par tourner dans le sens de leur mouvement orbital, c'est-à-dire dans le sens direct.

Appliquée aux systèmes planétaires, cette idée conduit Roche à supposer que les satellites ont conservé un mouvement de rotation égal à leur mouvement orbital et en induit la non-existence de satellites secondaires.

Approfondissant son étude, il cherche les conditions d'équilibre d'un satellite fluide de masse relativement très petite par rapport à sa planète, de même densité qu'elle et effectuant sa révolution en un

temps égal à celui de sa rotation axiale autour d'un axe perpendiculaire au plan de l'orbite. Il trouve que, dans ces conditions, il n'est pas possible qu'un satellite puisse subsister à l'état fluide à une distance de la planète moindre que deux fois et demie son rayon (2,44).

Nous verrons plus tard les conséquences de ce résultat numérique.

La région des astéroïdes. — Roche s'est préoccupé de rechercher si l'agglomération d'un anneau de Laplace en une masse sphéroïdale était toujours possible. Il assimile une nébuleuse planétaire à l'origine à une masse fluide, homogène, dont les molécules s'attirent mutuellement et soumise à l'attraction solaire, si bien que, dans son mouvement orbital, elle tourne constamment les mêmes parties de sa surface vers le Soleil. Dans ces conditions, il trouve qu'il est indispensable à l'existence du fluide, sous forme ellipsoïdale, que le rapport

$$U = \frac{M}{\rho a^3}$$

où M est la masse du Soleil, ρ la densité du fluide constituant la planète, a la distance de celle-ci au Soleil, soit inférieure à une certaine limite.

Revenons aux anneaux de Laplace. La matière qui les constitue a sensiblement la même densité que les régions de la nébuleuse d'où ils proviennent, en sorte que nous pouvons considérer ρ comme étant la densité des régions périphériques de la nébuleuse au moment de l'abandon d'un anneau.

Voyons donc comment a varié, dans notre système, cette fonction à partir de la planète la plus éloignée. « Si la nébuleuse solaire se conservait homogène pendant la contraction du système, ρ varierait alors en raison inverse du volume et le produit ρa^3 resterait constant. Mais, dès qu'un noyau s'est formé au centre de la nébulosité solaire, la condensation s'opère autour de ce centre et l'accroissement de ρ à la périphérie est moins rapide ; de sorte que, a diminuant peu à peu, le produit ρa^3 diminue aussi à la surface extérieure de la nébuleuse. U sera donc une fonction d'abord graduellement croissante à partir des limites de la nébuleuse qui pourra, lorsque le bord de celle-ci s'est suffisamment rapproché du centre, atteindre et dépasser la valeur numérique pour laquelle l'équilibre cesse d'exister et où, par conséquent, l'existence d'une planète sous forme ellipsoïdale, et proba-

blement sous toute autre figure, devient impossible. On doit présumer que cela s'est produit après la formation de la planète Jupiter; le rapport U ayant alors atteint la limite dont nous parlons et ρa^3 continuant à décroître, il est arrivé que, à la distance intermédiaire entre Jupiter et Mars où se serait formée une nouvelle planète, ce rapport s'est trouvé trop grand pour qu'elle pût subsister sous forme permanente. Dès lors la substance de l'anneau correspondant, au lieu de s'agglomérer en un grand sphéroïde, a dû se résoudre en nébulosités partielles se mouvant et se condensant isolément. »

En admettant que, par suite de leur condensation, ces nébulosités aient bientôt acquis une densité suffisante pour que U redevienne inférieur à la limite voulue, elles prendront alors une figure d'équilibre, deviendront de véritables planètes, mais en conservant désormais leur individualité. Telle est l'origine probable du groupe nombreux d'astéroïdes qui occupe cette région.

Que devient ensuite la nébuleuse solaire? Si sa condensation avait suivi la même marche que précédemment, U aurait probablement continué à croître, et par conséquent toute agglomération d'une zone abandonnée en une nébuleuse planétaire eût été impossible et le reste du système aurait été composé d'astéroïdes. Or, il n'en est pas ainsi; aux astéroïdes succèdent en réalité quatre planètes : Mars, la Terre, Vénus et Mercure. Il est donc de toute nécessité qu'un changement brusque dans la marche de la condensation de la nébuleuse solaire se soit alors produit, changement qui nous est d'ailleurs presque indiqué par ce fait que la densité de ces planètes est de quatre à cinq fois plus forte que celle des autres.

Anneaux intérieurs. — La conception la plus originale de Roche dans son essai sur la constitution du système solaire est sans doute celle de l'existence d'anneaux à l'intérieur de la nébuleuse.

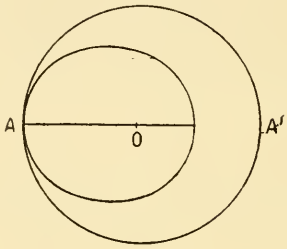
Nous avons vu comment il expliquait la formation d'anneaux tels que les avait conçus Laplace, mais là ne se borne pas la transformation de la nébuleuse.

En effet, d'après lui, « tout le fluide abandonné par la nébuleuse ne se disposera pas en anneaux décrivant le cercle équatorial et par conséquent extérieurs à l'atmosphère. Il n'en sera ainsi que pour ce qui se trouvait déjà dans le voisinage immédiat de l'équateur. Mais la portion du fluide atmosphérique en excès, qui des pôles descend

vers l'équateur en s'écoulant sur la surface libre, possédait primitivement une vitesse de circulation plus petite et variable suivant la distance polaire de chaque molécule. Cette vitesse peut, sans doute, augmenter un peu dans le trajet du pôle à l'équateur à cause du frottement sur des couches marchant plus vite, mais elle restera toujours inférieure à celle de la région équatoriale.

» La matière qui afflue à l'équateur n'est donc pas tout entière dans les conditions voulues pour décrire autour du centre O du Soleil de grands cercles concentriques. Chaque molécule commence à se mouvoir tangentiellement à l'équateur, mais chacune a sa vitesse

Fig. 90.



propre et va décrire (*fig.* 90) une ellipse de foyer O d'autant plus allongée que la vitesse est plus faible », l'aphélie A étant sur la limite équatoriale de l'atmosphère de la nébuleuse, le périhélie A' à l'intérieur.

Les molécules qui quittent l'équateur avec une vitesse faible ne tarderont pas à disparaître au sein de la nébuleuse, mais celles qui ont une vitesse suffisante circuleront dans des régions raréfiées de l'atmosphère et continueront leur mouvement. Les molécules parties successivement d'un même point de l'équateur décriront une même ellipse : leur ensemble constitue une *traînée elliptique*. Chaque point du cercle équatorial étant l'origine d'un courant tout pareil, ces traînées se gênent dans leurs mouvements mutuels : les vitesses radiales se détruisent deux à deux, tandis que dans le sens de la rotation les vitesses se conservent. « L'ensemble se transforme peu à peu en un système de cercles. » Comme la vitesse de circulation croît de l'aphélie au périhélie, il y a dans l'intervalle une position à la distance R_1 du centre O de la nébuleuse où la force centrifuge équilibre la pesanteur ; c'est à cette distance et sous la forme d'un

cercle de rayon R_1 que tendent à se réunir toutes les molécules parties avec la même vitesse des différents points du cerle équatorial. Finalement à chaque vitesse initiale correspond une traînée circulaire de rayon R_1. L'ensemble de ces traînées circulaires constitue un anneau intérieur à la nébuleuse qui, tout en étant situé dans son atmosphère, se meut indépendamment d'elle par suite de sa vitesse de rotation.

L'existence d'anneaux intérieurs va jeter quelque lumière sur certains phénomènes de notre système solaire, en particulier sur les anneaux de Saturne, le satellite de Mars, Phobos, et sur la formation de notre Lune.

Anneaux de Saturne. — Nous avons vu au début de cet exposé que l'atmosphère d'une planète ne pouvait pas s'étendre au delà d'une certaine « surface limite L ». Dans le cas de Saturne, d'après la durée actuelle de sa rotation, son atmosphère ne peut s'étendre dans le plan de l'équateur au delà de la distance 2 (en rayon de la planète), distance à laquelle la force centrifuge équilibre la gravité. Or, les anneaux sont situés entre les distances 1,3 et 2,3, en sorte qu'une partie est à l'intérieur et l'autre à l'extérieur de la surface limite actuelle. La partie des anneaux, au moins celle inférieure à la distance 2, doit son origine aux anneaux intérieurs conçus par Roche, et c'est pourquoi ils doivent tourner plus vite que la planète [1]; l'autre

---

[1] Soit ω la vitesse angulaire de rotation de la nébuleuse de masse M ; a son rayon équatorial à une époque d'instabilité, si bien qu'à la distance a la force centrifuge équilibre la gravité, c'est-à-dire que

$$\omega^2 a = \frac{M}{a^2}.$$

Considérons une molécule qui quitte l'équateur avec une vitesse $\varepsilon a \omega$ ($\varepsilon < 1$) pour faire partie d'une traînée elliptique. Si ω' est sa vitesse angulaire au moment où la force centrifuge équilibre la pesanteur, R_1 sa distance au centre,

$$\omega'^2 R_1 = \frac{M}{R_1^2}.$$

D'autre part, en vertu des lois du mouvement elliptique,

$$R_1^2 \omega' = a^2 \varepsilon \omega.$$

De ces trois relations on tire

$$R_1 = \varepsilon^2 a, \qquad \omega' = \frac{1}{\varepsilon^3} \omega.$$

Comme $\varepsilon < 1$, on a $\omega' > \omega$.

On voit donc que la traînée circulaire de rayon R_1, transformation des traînées

partie, située à une distance supérieure à 2, doit son origine vraisemblablement à un anneau extérieur de Laplace et sa durée de révolution surpasse celle de la rotation de Saturne.

La formation des anneaux de Saturne correspondrait d'après cela à une seule époque d'instabilité de sa nébuleuse. L'atmosphère, accompagnant la planète dans sa contraction, a finalement abandonné les anneaux, et comme la distance de ceux-ci à la planète est inférieure à la distance 2,44 de possibilité que nous avons signalée à propos de la formation des satellites, ils n'ont pas pu s'agglomérer en une masse sphéroïdale et ils ont dû se résoudre en astéroïdes séparés d'une façon tout à fait analogue à ce que nous avons vu à propos de l'essaim des petites planètes. Cette constitution des anneaux présentée par Cassini, confirmée par les travaux de Hirn et de Maxwell, est aujourd'hui universellement adoptée.

Satellites de Mars. — Phobos doit aussi son existence à la formation d'anneaux intérieurs à la nébuleuse. La limite équatoriale de l'atmosphère de Mars est, d'après sa durée actuelle de rotation, égale à 5,94 fois le rayon de la planète. Phobos, qui circule à une distance moyenne de 2,5, doit donc être considéré comme l'agglomération d'un anneau intérieur, en sorte que la rapidité de sa révolution n'a rien d'anormal, et cette agglomération a pu se faire puisque la distance à la planète est supérieure à la limite de possibilité 2,44 assignée par Roche.

Deimos dont la distance moyenne est 6,74 proviendrait d'un anneau extérieur.

Or, d'après les idées de Roche sur l'origine des anneaux intérieurs à la nébuleuse, ceux-ci ne peuvent évidemment se former sans que

---

elliptiques correspondant à la vitesse initiale $\varepsilon a \omega$, sera animé d'un mouvement de rotation plus rapide que la nébuleuse.

A quelle distance moyenne circulera l'anneau intérieur constitué par l'ensemble de ces traînées circulaires ? Il suffit pour le savoir de connaître la valeur moyenne de ε. Or, si l'on néglige le frottement et si l'on admet que toute la matière, qui s'écoule des pôles vers l'équateur pour donner naissance à des traînées elliptiques, entre dans la constitution de l'anneau intérieur, on peut calculer ε ; on trouve ainsi que sa valeur moyenne doit être comprise entre 0,500 et 0,636.

Ce résultat suppose que l'atmosphère est assez raréfiée pour qu'on puisse négliger sa présence. Mais si l'on en tient compte, on doit adopter pour ε une valeur bien plus grande, en sorte que ce sera au voisinage du bord équatorial que l'anneau intérieur pourra subsister.

se forment en même temps des anneaux extérieurs. Nous sommes ainsi portés à conclure que Phobos et Deimos doivent leur existence à une même période d'instabilité.

Adoptons cette hypothèse : le rayon moyen de l'orbite de Deimos représente la limite équatoriale a de la nébuleuse martienne quand elle passe par une période d'instabilité, celui de l'orbite de Phobos le rayon moyen R, de l'anneau intérieur formé à la même époque. On peut en déduire, d'après une formule donnée dans la note qui précède la valeur moyenne du coefficient ε; on trouve

$$\varepsilon = 0.632,$$

nombre compris entre les limites trouvées lorsque l'atmosphère est très raréfiée, supposition fort acceptable dans le cas de Mars, car la faible masse des satellites et leurs faibles distances à la planète semblent indiquer qu'au moment de leur formation la nébuleuse martienne était déjà considérablement condensée et entourée d'une atmosphère très peu dense.

Formation de la Lune. — Le mode de formation de la Lune dérive aussi, d'après Roche, de ses traînées elliptiques. Il commence par établir l'impossibilité de la production autour de la Terre d'anneaux de Laplace.

Depuis l'époque où la rotation de la Terre s'effectuait en un temps égal à la révolution, cette rotation s'est accélérée par degrés; à l'époque où elle s'est trouvée égale à $27^j,3$, la distance limite équatoriale étant de 60 rayons, la Terre formait une masse lenticulaire, différant complètement d'un sphéroïde de révolution, dont la forme et les dimensions étaient définies par les rayons rectangulaires suivants, estimés en rayons de la Terre, 60, 56 et 40, le plus grand 60 étant dirigé vers le Soleil; c'est vers cette distance que s'est formée la Lune.

« Mais, par suite de la différence croissante des vitesses angulaires de rotation et de translation, la nébuleuse terrestre était soumise à une marée énorme qui déplaçait constamment cet axe équatorial à son intérieur et la maintenait, surtout à l'équateur, dans un état continuel de déformation. On ne peut donc concevoir dans une pareille atmosphère un dépôt régulier d'anneaux circulaires suivant le plan de l'équateur terrestre soit en dehors, soit en dedans de l'atmosphère, parce que l'écoulement du fluide en excès, au lieu de s'opérer à chaque

instant sur tout le pourtour de l'équateur, n'a lieu que par les deux sommets du grand axe.

» Le fluide abandonné ainsi sporadiquement, ou bien se distribuera en petits amas distincts et isolés pouvant former des astéroïdes irrégulièrement dispersés et qui nous resteront inconnus, ou bien rentrera dans l'atmosphère, à cause de son peu de vitesse, pour s'y dissoudre ou parfois s'y condenser en petits noyaux discontinus qui seront laissés libres plus tard lors du retrait de l'atmosphère qui les enveloppe.

» Si un de ces noyaux, de dimensions plus considérables que les autres, a pu devenir un centre de condensation autour duquel ils se sont groupés, il en est résulté dans l'atmosphère même de la Terre une nouvelle nébuleuse origine de la Lune.

» Cette nébuleuse a nécessairement participé dès le début à la circulation du fluide atmosphérique dans lequel elle nageait pour ainsi dire; elle a dû prendre et conserver un mouvement de rotation égal à son mouvement de translation, autour d'un axe parallèle à l'axe de rotation de l'atmosphère.

» Le noyau lunaire grossit peu à peu par la condensation des matières voisines, sa densité augmente et son adhésion au fluide environnant diminue de plus en plus; pendant ce temps, le système entier continue à se contracter, et lorsque dans son mouvement de retrait la limite théorique arrive au noyau, celui-ci se détache de l'atmosphère au lieu de la suivre, et continue désormais son mouvement en toute liberté à une distance du centre très voisine de celle de sa formation. »

Résumé. — En résumé, Roche montre que, dans la portion du système solaire limitée par la planète Saturne, la plupart des anomalies apparentes qu'on a rencontrées à la théorie de Laplace s'expliquent aisément d'après les principes mêmes de cette théorie. Ce sont : la formation de l'anneau des Astéroïdes, la singularité que présente la durée de révolution de Phobos, la constitution et le mode de rotation des anneaux de Saturne, ainsi que les conditions particulières dans lesquelles se présente à nous le système Terre-Lune.

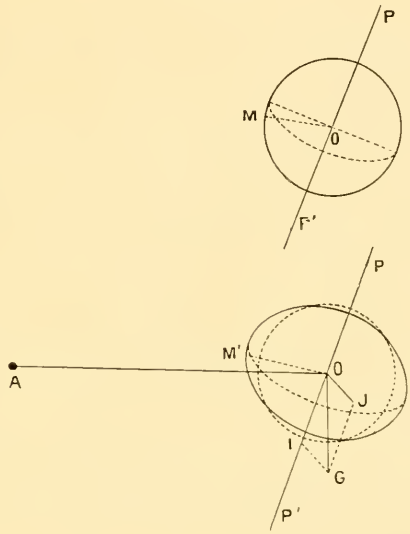
III. — Travaux de Darwin.

G. Darwin admet l'hypothèse nébulaire relative au mode de formation du système solaire et ce système, une fois obtenu, cherche

dans celles des actions réciproques des différents corps qui les composent qu'il appelle *des marées,* la cause unique, ou tout au moins prépondérante, des modifications qui ont peu à peu écarté ces corps de leurs situations réciproques respectives.

Notions sur les marées. — Soit une masse fluide dont toutes les molécules sont animées d'un mouvement de rotation uniforme de

Fig. 91.



même vitesse angulaire par rapport à un axe PP′ (*fig.* 91), de sorte qu'elle tourne comme un solide; cette masse prend la forme sphéroïdale et elle est en équilibre dynamique sous l'action de l'attraction mutuelle des molécules et de la force centrifuge.

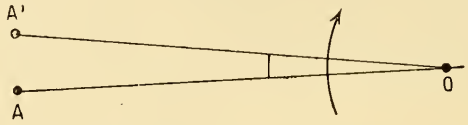
Imaginons un corps éloigné A attirant toutes les molécules du sphéroïde suivant la loi de Newton; celui-ci est déformé, cesse d'être de révolution autour de PP′ et prend sensiblement une forme ellipsoïdale dont le grand axe est dans le plan APP′. Cette déformation est le *phénomène de marée.*

Le point M de la surface, qui était primitivement à une distance a du centre, se trouve en M′ à la distance $a + \Delta a$. Δa se nomme la *hauteur de la marée.* Cette hauteur est maximum quand le méridien de M passe par A, minimum quand il est perpendiculaire à cette

position, si bien qu'un observateur entraîné avec le sphéroïde verra sa surface s'élever et s'abaisser. L'oscillation se produisant deux fois par révolution complète, on donne à cette marée le nom de *marée semi-diurne*.

Maintenant si la masse perturbatrice A se déplace suivant une orbite dont le plan est incliné par rapport à celui de l'équateur du

Fig. 92.



sphéroïde, la marée semi-diurne dépendant de l'angle de OA avec le plan de l'équateur varie périodiquement. L'altération qui en résulte pour la marée semi-diurne porte le nom de *marée semi-annuelle* ou *semi-mensuelle* suivant que le corps A provoquant la marée est le Soleil ou un satellite du sphéroïde déformé.

Ce que nous venons de dire suppose le fluide parfait. S'il est visqueux, les molécules ne peuvent pas se déplacer sans vaincre la résistance introduite par la viscocité; leur déplacement n'est donc pas instantané. Le maximum de la marée pour un point de la surface au lieu de se produire quand son plan méridien contient le point A, a lieu un peu plus tard comme si la masse perturbatrice (*fig.* 92) était dans une direction OA'. L'angle AOA' mesure *le retard de la marée :* il est d'autant plus grand que la vitesse de rotation et la viscosité sont plus grandes.

Comme conséquence de la viscosité, il y a aussi une diminution dans la hauteur de la marée.

On peut grossièrement se rendre compte de l'influence que peut avoir le frottement dû à la viscosité sur le mouvement du sphéroïde autour de son centre d'inertie.

Le corps A (*fig.* 91) tend à retenir la marée soulevée et à s'opposer à son mouvement d'entraînement. L'effet peut être représenté par un couple OG que nous décomposerons en deux : l'un d'axe OI suivant l'axe de rotation PP', l'autre OJ dans le plan de l'équateur. Le couple OI aura pour effet de retarder la rotation du sphéroïde sur lui-même, le couple OJ de modifier la position de l'axe de rotation PP' dans l'espace.

Si donc nous supposons le sphéroïde animé d'un mouvement orbital relativement au point A, l'inclinaison de son équateur par rapport au plan de l'orbite change sous l'influence du frottement des marées.

En même temps qu'il cause ce changement d'inclinaison, le frottement diminue la vitesse de rotation du sphéroïde sur lui-même et par suite la quantité de mouvement de rotation. Il en résulte, en vertu du principe des aires, et en négligeant l'énergie transformée en énergie calorifique, un accroissement du mouvement orbital du sphéroïde déformé.

On voit donc que :

1° L'attraction du Soleil sur une planète, supposée fluide et homogène et tournant sur elle-même en un temps plus court que sa durée de révolution, diminuera progressivement sa vitesse de rotation et en même temps l'éloignera du Soleil; c'est en définitive, en partant du principe de la conservation de l'énergie du mouvement, une transformation d'une portion du mouvement de rotation de la planète en une augmentation de son mouvement orbital. C'est l'effet de ce que Darwin appelle la *marée solaire*.

2° Dans les mêmes conditions de mouvement, tout satellite provoque sur la planète qu'il accompagne une marée qui diminue la vitesse de rotation de celle-ci et en même temps par réaction, et en vertu du même principe appliqué cette fois aux systèmes des deux astres, éloigne le satellite de la planète et augmente la durée de sa révolution. C'est l'effet de ce que Darwin appelle la *marée satellitaire*.

Ces effets seraient de signes inverses si l'on supposait le mouvement angulaire orbital du satellite supérieur au mouvement angulaire de rotation de la planète; les marées seraient alors *renversées*.

Évaluation des énergies. — Toute étude de l'effet des marées doit donc commencer par une évaluation de l'énergie de mouvement possédée par les corps du système solaire, l'énergie du mouvement orbital et l'énergie du mouvement de rotation. On la trouvera dans le Tableau suivant qui donne dans les colonnes :

I. Le moment de la quantité de mouvement orbital de la planète, sa masse comprenant celle des satellites.

II. 10^{10} fois le moment de la quantité de mouvement de rotation de la planète.

III. 10^{10} fois le moment de la quantité de mouvement orbital des satellites.

IV. Rapport des nombres de la colonne III à ceux de la colonne II.

V. La quantité de mouvement total de chaque système, c'est-à-dire la somme des colonnes II et III.

	I.	II.	III.	IV.	V.
Mercure..	0,00079	0,34?	»	»	0,34
Vénus....	0,01309	28,6?	»	»	28,6?
Terre.....	0,01720	37,88	181	4,78	216
Mars.....	0.00253	1,08	très petit	très petit	1,08
Jupiter...	13,469	2594000	20000	$\frac{1}{130}$	2614000
Saturne...	5,456	500000 à 700000	16000 ou plus grand	$\frac{1}{30}$ ou plus grand	520000 à 720000
Uranus...	1,323				
Neptune..	1,806				
Soleil.....	0,444	Énergie de mouvement du Soleil dû à sa rotation sur lui-même.			
	22,088	Énergie totale du système solaire tout entier.			

L'étude de ce Tableau conduit à différentes remarques :

1° L'énergie de mouvement de rotation du Soleil est moins de $\frac{1}{30}$ de l'énergie totale du système solaire tout entier.

2° Le rapport des nombres des colonnes I et V montre que le moment de la quantité de mouvement interne de chaque système est très petit en comparaison de la quantité de mouvement orbital. C'est pour le système de Jupiter que ce rapport est le plus grand et il est égal à

$$\frac{0,00026}{13} = \frac{1}{50000},$$

en sorte que, si l'on attribuait aux marées solaires la perte de l'énergie intérieure du système de Jupiter, le rayon moyen de l'orbite de Jupiter ne serait modifié que de $\frac{1}{100000}$ de sa valeur.

Cette altération du rayon moyen est encore plus faible pour les autres planètes, et l'on peut presque conclure avec certitude que le frottement des marées n'a pu modifier beaucoup les dimensions des orbites. Ce résultat semble justifié par l'existence d'une loi telle que la loi de Bode dans la répartition des distances.

3° Les nombres de la colonne IV montrent que dans le système Terre-Lune, le rapport de la quantité de mouvement orbital du

satellite à la quantité de mouvement de rotation de la planète, est infiniment plus grand que dans les autres systèmes planétaires; en d'autres termes, l'effet des marées satellitaires y est de beaucoup supérieur à ce qu'il a pu être dans les autres systèmes, et il semble si important à Darwin, qu'il lui attribue la différence frappante qui existe entre les conditions physiques du système Terre-Lune et celle des autres et le considère comme le facteur prépondérant dans son évolution (*voir* P. Puiseux, *La Terre et la Lune,* Chap. IX).

L'effet des marées paraît, au contraire, bien moins important dans les autres systèmes planétaires, quoiqu'on ne puisse pas totalement l'y négliger; mais, ignorant complètement les conditions physiques par lesquelles ont passé les planètes aux diverses époques de leur évolution, nos études à ce sujet ne conduiraient qu'à des conclusions d'ordre purement spéculatif.

Nous retiendrons néanmoins ce résultat obtenu par Darwin dans son étude du frottement des marées solaires et satellitaires sur une planète visqueuse que l'inclinaison de l'équateur de la planète sur le plan de l'orbite, supposée d'abord nulle, croît avec le temps.

Marée solaire. Mercure, Vénus. — La marée solaire diminue la vitesse du mouvement de rotation de la planète, et son effet est d'autant plus grand que celle-ci est plus rapprochée du Soleil. Si cette diminution est assez forte, la vitesse de rotation de la planète pourra se maintenir assez faible pour qu'elle ne passe jamais par une époque d'instabilité. Cette considération fait comprendre pourquoi les planètes les plus voisines du Soleil, Mercure et Vénus, n'ont pas de satellites et pourquoi le nombre des satellites augmente progressivement à mesure que l'on s'éloigne du Soleil.

Pour la Terre, on peut concevoir qu'il y a eu égalité pendant très longtemps entre le retard amené par le frottement des marées et l'accroissement de la rotation dû à la contraction; en sorte que, pendant toute cette période, il n'y a pas eu d'époque d'instabilité. Lorsque celle-ci a eu lieu, la condensation était très avancée, et ceci explique pourquoi la masse de la Lune est considérable par rapport à la Terre relativement aux masses comparées des satellites à leurs planètes.

Influence de la masse. Mars, Phobos. — Mais il est une autre cause à ces différences dans les durées de l'évolution des systèmes

planétaires ; l'une des plus importantes est l'inégalité des masses des planètes. Plus la masse de la planète sera grande, plus lentement se fera l'évolution ; la marée agissant, en effet, par une diminution de l'énergie de mouvement du système et la fin de l'évolution, correspondant à un même état pour tous, celle-ci sera atteinte d'autant plus tard que la quantité d'énergie à transformer par la marée solaire sera plus considérable.

La considération des masses (Terre = 1) : Mars 0,1, Jupiter 301, Saturne 90, Uranus 14, Neptune 16, porte Darwin à conclure que Mars serait plus avancé dans son évolution que les planètes qui le suivent, quoiqu'elles aient pris naissance avant lui.

Le système Mars nous offre une autre particularité jusqu'ici unique dans le système solaire et que Darwin qualifie de « fait le plus remarquable de ce système », à savoir : *Phobos effectue sa révolution autour de Mars dans un temps moindre que la durée de rotation axiale de celui-ci.*

Les marées lui en fournissent l'explication suivante : quelle que soit la façon dont ce satellite se soit séparé de Mars, que ce soit par condensation d'un anneau de Laplace, ou par détachement d'une protubérance unique, la durée actuelle de sa révolution, si elle n'a pas varié depuis, est précisément égale à la durée de rotation de la planète au moment de sa formation. Or, depuis lors, le frottement dû à la marée solaire a augmenté graduellement la durée de la rotation de Mars jusqu'à sa valeur actuelle $24^h 37^m$; tandis qu'au contraire, en raison de la faible masse de Phobos, les actions réciproques de Mars et du satellite n'ont pu que changer fort peu leur distance et par suite la durée de sa révolution. Il est à remarquer, en outre, que si ce changement était sensible, il consisterait en un rapprochement de la planète et du satellite, amenant une diminution dans la durée de révolution de celui-ci.

C'est un autre mode d'explication que celui que Roche a indiqué ; mais il est tout aussi plausible.

Inclinaison de l'équateur de Mars. — Le plan de l'équateur de Mars fait actuellement un angle de 27° avec le plan de son orbite ; cette forte inclinaison n'est point pour effrayer l'astronome anglais ; et, d'après lui, elle peut s'expliquer par l'action de la marée solaire, qui aurait peu à peu abaissé l'axe de rotation d'abord sensiblement

perpendiculaire au plan de l'orbite: mais un changement aussi considérable exige que la viscosité de la planète ait déjà atteint une valeur assez forte, ce qui est une nouvelle preuve du plus grand état d'avancement relatif de l'évolution de la planète Mars.

Jupiter. — La rotation rapide de Jupiter, l'existence de satellites rapprochés et effectuant leur révolution en un temps très court, la faible inclinaison (2°) de l'équateur sur le plan de l'orbite sont des caractères indiquant que la planète est peu avancée dans son évolution; tout cela est dû à la grandeur de la masse de Jupiter.

Saturne, Uranus, Neptune. — Saturne, comme Jupiter, présente les caractères d'une planète relativement peu avancée : une courte durée de rotation, une révolution rapide des satellites intérieurs, l'existence de l'anneau; quant à l'inclinaison considérable (28°) de l'équateur de Saturne sur le plan de l'orbite, il est bien difficile de l'attribuer, comme pour Mars, uniquement aux marées solaires; la distance de Saturne au Soleil est trop grande, sept fois environ celle de Mars, de sorte qu'en admettant qu'entre les deux planètes il n'y ait d'autre différence que la distance, il faudrait aux marées solaires 540000 fois plus de temps pour produire sur l'inclinaison de Saturne le même effet que sur celle de Mars. Aussi, Darwin est-il porté à conclure qu'au moment de la formation de Saturne son équateur était déjà incliné sur le plan de son orbite; à plus forte raison est-il obligé d'admettre pour Uranus et Neptune, une obliquité primitive considérable et même un mouvement rétrograde originel pour Neptune.

Résumé. — En résumé, du travail de Darwin il résulte que les frottements des marées ont pu avoir une influence considérable sur l'évolution des planètes rapprochées du Soleil; mais pour les planètes extérieures, à partir de Jupiter, la théorie des marées ne peut à elle seule nous permettre d'établir l'histoire de ces planètes.

« Le frottement des marées est une cause de modifications dont la théorie de Laplace ne tient pas compte; et, quoique cette influence se rapporte à une période postérieure à celle des événements décrits dans l'hypothèse de la nébuleuse, cependant cette influence a été d'une importance considérable, et même à un moment peut-être prépondérante, en déterminant les conditions présentes des planètes et de leurs satellites. »

IV. — Hypothèse de Faye.

Les travaux de Roche et de Darwin expliquent bien des particularités du système solaire; mais certaines difficultés restent entières, en particulier les inclinaisons supérieures à 90° des plans des orbites des satellites d'Uranus et de Neptune ou, ce qui revient au même, le sens rétrograde de leurs révolutions. L'hypothèse cosmogonique de Laplace étant basée sur ce que dans le système solaire tous les mouvements de révolution et de rotation sont directs, l'existence de ces mouvements rétrogrades est « un coup fatal pour elle »; il en résulte, en effet, que dans le monde solaire il faut distinguer deux régions par rapport aux rotations des planètes et aux mouvements de leurs satellites : la région intérieure où les planètes anciennement connues tournent sur elles-mêmes avec leurs satellites en sens direct, et la région extérieure, bien plus vaste, où les satellites circulent autour de leurs planètes en sens rétrograde. D'après Faye, à qui j'emprunte ces lignes, l'hypothèse cosmogonique de Laplace est donc inacceptable ; voici comment il la remplace.

Les planètes ne se seraient pas formées toutes d'après un mode unique, mais, au contraire, il y aurait eu pour le monde solaire deux modes de formation.

Constitution de la nébuleuse. — Faye suppose la nébuleuse solaire à l'origine homogène et sphérique s'étendant bien au delà de l'orbite de Neptune, formée d'un milieu très rare et possédant un lent mouvement tourbillonnaire affectant une partie de ses matériaux.

« Dans un pareil amas de matière, la pesanteur interne, résultant des forces attractives de toutes les molécules, varie en raison directe de la distance au centre. Les particules ou les petits corps qui se meuvent dans un tel milieu, dont la rareté est inimaginable, décrivent nécessairement des ellipses ou des cercles autour du centre, *dans le même temps*, quelle que soit leur distance à ce centre. Dès lors, l'existence d'anneaux tournant tout d'une pièce, d'un même mouvement de rotation, est parfaitement compatible avec ce genre de pesanteur, et, si un mouvement tourbillonnaire a préexisté, quelques-unes de ces spires, assez peu différentes de cercles, auront dû peu à peu, par la faible résistance du milieu, se convertir spontanément dans un ensemble d'anneaux. »

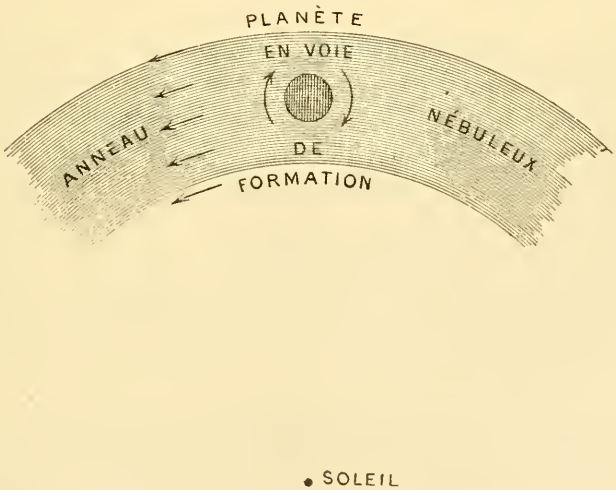
» *Planètes à rotation directe.* — La nébuleuse tourne lentement sur elle-même par le mouvement qu'elle a reçu à l'origine. Dans son intérieur, des mouvements elliptiques de chaque particule autour du centre sont possibles dans tous les plans passant par ce centre; mais ceux-là seuls peuvent persister qui sont d'accord avec le mouvement de rotation générale, et la nébuleuse tourne tout d'une pièce autour d'un axe unique avec une lenteur extrême.

» La rupture des anneaux intérieurs donne ensuite naissance à des planètes qui continuent à circuler dans le sens direct, comme celles qui naissent des anneaux de Laplace; et leur mouvement de rotation est aussi direct.

» Dans la nébuleuse primitive, homogène et sphérique, où la présence d'anneaux circulaires autour du centre ne change rien à la loi de la pesanteur interne, nous avons vu que cette pesanteur variait en raison directe de la distance au centre. Mais, plus tard, le Soleil s'est formé par la réunion de tous les matériaux non engagés dans ces anneaux; il a fait le vide autour de lui.

» *Planètes à rotation rétrograde.* — Alors la loi de la pesanteur à l'intérieur du système ainsi modifié a été toute différente. Sous

Fig. 93.



l'action de la masse prépondérante du Soleil (celle des anneaux n'en était pas la sept-centième partie), la pesanteur interne a varié, non

en raison directe de la distance, mais en raison inverse du carré de la distance au centre, et tel est aujourd'hui l'état des choses.

» Dans ce dernier cas, le mode de rotation d'un anneau de matière diffuse change du tout au tout. Tandis que, sous l'empire de la première loi de la pesanteur, les vitesses linéaires de circulation dans ces anneaux croissaient en raison de la distance, sous l'empire de la deuxième ces vitesses décroissaient au contraire en raison de la racine carrée de cette même distance. Pour le premier de ces deux modes (de circulation), lorsque l'anneau dégénéra en un système secondaire, c'est-à-dire en une nébuleuse avec ses anneaux intérieurs, et finalement en une planète avec ses satellites, la rotation de la planète et la circulation des satellites seront de même sens que le mouvement de l'anneau générateur, c'est-à-dire le sens direct. Pour le deuxième mode, le système ainsi formé sera rétrograde (*fig.* 93).

» Que conclure de là? C'est évidemment que les planètes comprises dans la région centrale, depuis Mercure jusqu'à Saturne, se sont formées sous l'empire de la première loi, lorsque le Soleil n'existait pas encore ou n'avait pas acquis une masse prépondérante, et que les planètes comprises dans la région extérieure, de beaucoup la plus large, se sont formées lorsque le Soleil existait déjà.

» *Satellites.* — La formation des satellites est due à une cause semblable à celle qui a engendré les planètes. La rupture de chaque anneau produit une nébuleuse en rotation, dans l'intérieur de laquelle naissent des anneaux. Les uns subsistent, c'est le cas le plus rare, dont Saturne seul offre un exemple; les autres se résolvent en satellites. Les distances de ces anneaux et de ces satellites à la planète centrale sont d'ailleurs quelconques.

» Les inclinaisons des orbites peuvent également avoir, dès l'origine, des valeurs plus considérables que ne le permet le système des anneaux extérieurs. »

Discussion. — Si ingénieuse qu'elle soit, cette théorie n'a pas été acceptée par la majorité des astronomes. Comment, en effet, en présence de la loi de Bode qui rend les distances des planètes au Soleil si dépendantes les unes des autres et qui, d'après certains astronomes, permettrait d'obtenir la loi de leur formation dans le

temps, comment peut-on admettre qu'à l'origine elles se soient formées au hasard comme le prétend Faye ?

Comment aussi comprendre que les planètes les plus éloignées du Soleil se soient formées les dernières? Enfin, la théorie de Faye ne peut expliquer les mouvements rétrogrades de Phœbé et du huitième satellite de Jupiter.

D'autre part, n'avons-nous pas un moyen plus simple et plus homogène de nous rendre compte de ces faits, qu'on s'est habitué à considérer comme anormaux? La réponse à cette question va nous être donnée par l'analyse des travaux de M. Stratton.

Il est cependant une chose à retenir de la théorie de Faye, c'est que, d'après ce célèbre astronome, les anneaux détachés de la nébuleuse solaire sont tout aussi aptes à remplir le rôle de générateurs de planètes, soit qu'ils tournent tout d'une pièce comme un cerceau solide, ainsi que le concevait Laplace, soit au contraire qu'ils soient composés de particules indépendantes circulant isolément autour de la condensation centrale suivant les lois de Képler et engendrant alors des planètes à grande inclinaison sur le plan de leurs orbites et, par suite, des satellites à révolution rétrograde.

V. — Travaux de M. Stratton. Inversion planétaire.

Suggestion de W.-H. Pickering. — Peu après la constatation que le neuvième satellite de Saturne, Phœbé, effectuait sa révolution en sens rétrograde, W.-H. Pickering émit l'idée que cette anomalie pouvait être expliquée en supposant qu'à l'origine toutes les planètes tournaient sur elles-mêmes en sens rétrograde et que le frottement dû aux marées avait ramené graduellement les axes de rotation de certaines d'entre elles à leurs positions actuelles.

En effet, si un satellite s'est détaché de la planète à une époque peu avancée de l'évolution planétaire, il commencera alors par se mouvoir autour de la planète en sens rétrograde; si l'aplatissement de cette dernière est faible ou si le satellite en est très distant, le plan de l'orbite de celui-ci ne suivra pas le plan de l'équateur planétaire dans le mouvement qui l'éloigne de son inclinaison primitive, mais restera en arrière de lui. C'est le type que présente Phœbé.

Si, au contraire, le satellite a été formé à un stade plus avancé du développement de la planète, c'est-à-dire lorsqu'elle s'est considéra-

blement contractée et aplatie, le plan de son orbite suivra l'équateur planétaire et aura, par rapport à lui, une position stable, coïncidant d'ailleurs presque avec lui ; c'est à cette classe qu'appartiennent la plupart des satellites connus du système solaire et, en particulier, tous ceux de Saturne connus avant Phœbé.

C'est cette Note de Pickering qui a suggéré les travaux de M. Stratton.

A l'origine toutes les planètes tournaient en sens rétrograde. — Que les planètes aient tourné toutes à l'origine dans le sens rétrograde, cela est, ainsi que nous l'avons déjà vu, très admissible en conservant les grandes lignes de l'hypothèse de Laplace ; d'après cet illustre astronome, tous les anneaux générateurs de planètes circulaient à l'origine suivant les lois de Képler et, par conséquent, les planètes produites tourneraient toutes en sens rétrograde ; pour obtenir des rotations directes, il a dû introduire, après leur production, une force nouvelle ; cette force, c'est le frottement mutuel des couches concentriques de l'anneau nébuleux qu'il assimile à une atmosphère en mouvement de rotation, frottement qui, peu à peu, fait tourner les couches extérieures avec la même vitesse angulaire que les couches intérieures, comme si l'ensemble formait un tout solide. Supprimons cette force additionnelle, en d'autres termes supposons que l'anneau nébuleux générateur continue à circuler planétairement suivant les lois de Képler ; il donnera naissance à une planète de rotation rétrograde.

Inversion planétaire. — Quant au renversement, pour ainsi dire, du plan de l'équateur planétaire par l'action du frottement des marées, c'était une vue audacieuse que ne faisaient pas soupçonner les travaux de Darwin et dont il fallait démontrer la réalité ; c'est en cette tentative de démonstration que consiste l'originalité du travail de M. Stratton.

Adoptant dans ses grandes lignes l'hypothèse nébulaire de Laplace, il admet qu'une planète en formation est un corps se contractant graduellement et pouvant passer de temps en temps par un état d'instabilité aboutissant à la formation d'un satellite.

En outre, pour lui toutes les planètes tournaient à l'origine en sens rétrograde ; mais, Adams ayant démontré que, pour une planète, l'attraction newtonienne seule de ses satellites ou du Soleil ne peut amener aucune altération séculaire de son obliquité, il admet que le

facteur déterminant de ces variations séculaires est le frottement dû aux marées.

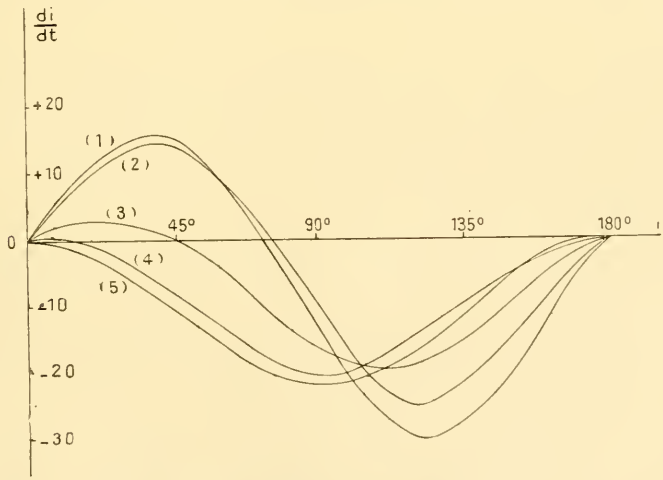
Prenant alors comme base les travaux de Darwin sur l'action des marées, usant des mêmes formules, il en étend librement l'emploi jusqu'à arriver au problème qu'il considère. Pour lui d'ailleurs, comme pour Darwin, une marée est toujours une déformation d'ensemble de la planète, qu'on suppose être un sphéroïde incompressible, homogène et visqueux.

D'après Laplace, en effet, la compressibilité n'a pas, en général, d'influence sensible; et d'autre part, d'après Darwin, il importe peu que le sphéroïde soit hétérogène s'il existe à sa surface une couche superficielle, même de faible viscosité.

Enfin, cet astronome ayant montré (p. 256) que le frottement dû aux marées n'a pu que changer très faiblement les dimensions des orbites, M. Stratton a toujours considéré les distances moyennes des planètes comme ayant leurs valeurs actuelles.

Résultats de M. Stratton. — L'étude de M. Stratton se limite à la recherche des effets que peuvent avoir les frottements des marées

Fig. 94.



sur l'inclinaison du plan de l'équateur d'une planète par rapport au plan de son orbite.

Marées solaires. Planètes sans satellites. — Envisageant d'abord une planète dépourvue de satellites, il trouve que, sous l'influence des marées solaires seules, la dérivée $\frac{di}{dt}$ de l'inclinaison i par rapport au temps varie en fonction de i, comme l'indique la figure 94. Les courbes sont numérotées dans l'ordre des viscosités croissantes, la courbe 5 correspondant à un coefficient de viscosité presque infini.

Ces courbes montrent que, quelle que soit la viscosité, $\frac{di}{dt}$ s'annule pour une valeur de i comprise entre 0° et 90°. L'inclinaison i supposée d'abord de 180° diminue, passe par un minimum compris entre 90° et 0°, d'autant plus voisin de 0° que la viscosité est plus grande; en sorte que, si nous supposons que, la planète se contractant à mesure qu'elle avance en âge, sa viscosité augmente, le plan de son équateur tendra à rejoindre par son autre face celui de l'orbite et l'inclinaison sera presque nulle. Notons toutefois que, d'après ce que nous avons dit plus haut, si la planète malgré sa contraction a conservé une couche fluide de faible viscosité à sa surface, elle se comportera comme si elle était constituée par une masse fluide de faible viscosité, si bien que pour une telle planète l'obliquité minimum pourra être considérable.

Dès que l'inclinaison est inférieure à 90° le mouvement de rotation est direct.

Mercure et Vénus. — En appliquant ces résultats aux planètes voisines du Soleil, M. Stratton conclut que Mercure, ayant atteint une faible obliquité, n'a pas d'océan, et que pour Vénus les marées superficielles océaniques n'ont pas eu d'effets appréciables.

Mars. — Mars possédant des satellites extrêmement petits, nous pouvons négliger leur présence, en sorte que l'équateur de Mars s'est déplacé presque autant que celui de la Terre (avant la naissance de la Lune), et, s'il y a des mers à la surface de la planète, il tend à devenir perpendiculaire au plan de l'orbite.

Marées satellitaires. Planètes avec satellites. — Pour les planètes ayant des satellites, les marées satellitaires viennent se combiner à la marée solaire et en modifient les effets.

D'une façon générale, un satellite situé dans le plan de l'équateur

de la planète n'a pas d'effet direct sur son inclinaison; mais il n'en est pas de même de l'action du Soleil sur les déformations dues aux marées satellitaires, action qui aura pour effet d'augmenter l'inclinaison si celle-ci est supérieure à 90°, et de la diminuer si elle est inférieure à 90°.

Jupiter, Satellite VIII. Saturne, Phœbé. — Dans les systèmes de Jupiter et de Saturne, l'existence des satellites intérieurs (le calcul montre, en effet, qu'on peut négliger les autres, étant données leurs faibles masses et leurs grandes distances) entraînerait par conséquent une diminution progressive de l'inclinaison vers 0°.

Pour Jupiter, le satellite VIII, si nous interprétons bien les idées de M. Stratton, s'est formé alors que l'inclinaison était plus grande que 90°; mais, par suite de sa grande distance à la planète, son orbite n'a pas suivi l'équateur de celle-ci, et son mouvement est resté rétrograde.

Quant aux autres satellites, bien certainement les cinq intérieurs se sont formés alors que l'inclinaison était devenue inférieure à 90°. Mais il semble possible que les deux autres, VI et VII, se soient formés et aient évolué comme les satellites de Saturne, Japet et Hypérion, dont nous parlons plus loin. C'est de notre part une simple analogie; il n'y a rien à leur sujet dans le Mémoire de M. Stratton. Leur présence a d'ailleurs contribué à la diminution de l'inclinaison jusqu'à sa valeur actuelle.

De même, dans le système de Saturne, Phœbé s'est détaché à une époque où l'inclinaison était très supérieure à 90°. Son mouvement était alors nécessairement rétrograde et il s'est conservé ainsi, le satellite étant trop loin de la planète pour que le plan de son orbite ait suivi le plan de l'équateur de celle-ci, et d'autre part l'action du Soleil ramenant dans ce cas le plan de l'orbite du satellite vers celui de l'orbite de la planète.

Japet et Hypérion ont pu se former aussi à une époque où l'inclinaison de l'équateur planétaire était supérieure à 90°; mais les calculs de M. Stratton montrent qu'alors les plans de leurs orbites peuvent avoir suivi le plan de l'équateur, en sorte que les satellites auraient actuellement un mouvement direct.

A partir d'Hypérion, tous les satellites se seraient certainement formés lorsque l'inclinaison était déjà inférieure à 90°; car, dans le

cas contraire, Titan aurait à lui seul, par suite de la marée satellitaire, fait croître l'inclinaison vers la valeur 180°.

Comparaison des marées solaires sur les différentes planètes. — En outre de ces détails concernant chaque planète, il serait intéressant de pouvoir comparer les grandeurs relatives des couples par lesquels le Soleil agit sur les différentes planètes supposées sans satellites.

M. Stratton déduit cette comparaison des rapports des durées nécessaires à chacune d'elles pour une même variation dans l'inclinaison ; il suppose d'ailleurs que la viscosité, toujours faible, varie avec la densité. D'après lui, ces durées sont proportionnelles aux nombres suivants :

Mercure	222 000 000
Vénus	1 440 000
La Terre	140 000
Mars	77 200
Jupiter	1
Saturne	$\frac{1}{7}$
Uranus	$\frac{1}{120}$
Neptune	$\frac{1}{2200}$

Mais les bases de ce calcul sont tellement hypothétiques, qu'on ne peut en retenir les résultats qu'à titre de simple indication. Ils jettent cependant une certaine clarté sur l'immense intervalle de temps qui a séparé la formation de la première planète, Neptune, de la naissance de la dernière, Mercure.

Uranus. — La théorie, appliquée à Uranus, porte à conclure que l'inclinaison de cette planète a d'abord diminué, sans toutefois devenir inférieure à 90°. Il est parfaitement fondé d'admettre qu'après la formation des quatre satellites, l'action prépondérante est devenue celle du Soleil sur les marées satellitaires et que, par suite, l'obliquité s'est mis à croître et rétrograde actuellement vers 180°.

Neptune. — Quant à Neptune, l'action du Soleil n'a pas pu déplacer beaucoup son équateur hors de sa position primitive, et l'existence de son satellite rend très admissible que l'inclinaison de Neptune augmente actuellement vers 180°.

Résumé. — En résumé, tandis que les dimensions et les inclinaisons des orbites de toutes les planètes sont, depuis leur naissance, restées les mêmes ou tout au moins n'ont varié que dans des limites très rapprochées, les inclinaisons de leurs équateurs sur les plans de ces mêmes orbites ont varié progressivement et sont en général bien différentes aujourd'hui de ce qu'elles étaient au moment où ces planètes se sont formées aux dépens des anneaux abandonnés par la nébuleuse solaire, et de plus très différentes entre elles.

En particulier, pour les deux planètes les plus âgées, Neptune et Uranus, l'action si faible des marées solaires a dû mettre un temps très long à relever leurs équateurs; pendant cette longue période, leurs satellites, de formation d'ailleurs assez rapide par suite de la faible densité de la planète génératrice, ont eu la possibilité de se séparer d'elle ; et, une fois formés, ils ont agi pour ramener les équateurs vers l'inclinaison de 180°. Pour Uranus, l'action solaire, environ vingt fois plus rapide que sur Neptune, a relevé plus vite l'équateur planétaire; en même temps, sa densité étant plus grande, la production des satellites a demandé plus de temps, de sorte qu'ils n'ont pu agir sur l'inclinaison de l'équateur que lorsque celui-ci était déjà presque perpendiculaire au plan de l'orbite.

D'autre part, alors que forcément les planètes circulent autour du Soleil toutes dans le même sens, il en est autrement, relativement à leur planète, pour tous les satellites d'un même système. Les plus éloignés, et par suite les premiers nés, peuvent circuler autour de la planète en sens rétrograde, tandis que les plus jeunes effectueront leur révolution en sens direct.

« Considérée dans ses grandes lignes, dit M. Stratton, la théorie de l'inversion planétaire, à part quelques difficultés de détail, reste une hypothèse soutenable.

» Elle exige simplement qu'on admette que les satellites des planètes se sont formés, comme les planètes elles-mêmes, dans l'ordre de leurs distances, les plus éloignées avant les plus rapprochées, et que la cause prépondérante de la variation séculaire de l'inclinaison des équateurs planétaires est le frottement des marées. »

VI. — Conclusion.

A la lumière de cet ensemble de travaux, il semble qu'on peut au-

jourd'hui se faire sur la formation du système planétaire une idée assez approchée de la vérité. Il ne s'agit pas d'ailleurs de remonter à son origine première, problème que la Science actuelle ne permet pas d'aborder avec chance de succès; mais, partant d'un état déterminé par lequel il a dû, selon toute probabilité, passer à une époque de sa vie, il semble possible d'assister aux différentes phases de son évolution ultérieure.

Cet état est celui d'une masse nébuleuse déjà pourvue d'une condensation centrale, qui par son attraction continue amène peu à peu vers elle les portions qui l'entourent en même temps qu'elle communique à l'ensemble un mouvement croissant de rotation, ainsi qu'un échauffement croissant de l'extérieur à l'intérieur.

Cet échauffement, nous nous contentons de le signaler; l'étude de ses effets est en dehors du cadre de cet Ouvrage.

Par suite de cette rotation croissante, la nébuleuse prend une forme de plus en plus aplatie et, comme l'a si bien indiqué Laplace, laisse, à époques très distantes les unes des autres, échapper des régions voisines de son équateur une portion d'elle-même formant chaque fois autour d'elle un anneau limité de particules distinctes.

Chacun de ces anneaux, successivement détachés, est l'origine d'une planète circulant autour de la nébuleuse dans le sens de sa rotation et dans un plan voisin de son équateur. Par quel procédé ces particules distinctes se sont-elles réunies pour former un seul corps, la planète? Nous l'ignorons; et c'est un problème réservé aux chercheurs de l'avenir ([1]).

Mais, ce corps une fois formé, il s'en détache des anneaux secondaires donnant naissance à des satellites suivant le même mode de séparation qui a produit les planètes.

D'après les notions nouvellement acquises, et que nous avons analysées dans ce Chapitre, les anneaux de Laplace, au lieu de constituer, par suite du frottement réciproque de leurs molécules, comme un anneau solide tournant autour de la nébuleuse solaire d'un même mouvement angulaire, resteraient composés de particules indépendantes se mouvant autour d'elle séparément et régies toutes à cet égard par les lois de Képler.

([1]) Problème aussi, et peut-être plus, compliqué dans la conception de Laplace que dans celle que nous admettrons.

Les anneaux de Saturne offrent un exemple frappant de ce mode de constitution et de mouvement.

Toutes les planètes ont donc dû à leur origine avoir un mouvement de rotation rétrograde.

En d'autres termes, à l'origine, les équateurs de toutes les planètes ont dû avoir par rapport à l'équateur de la nébuleuse solaire une inclinaison voisine de 180°.

Mais, après leur séparation de cette nébuleuse, les planètes ne lui sont pas devenues pour ainsi dire indifférentes, uniquement rattachées à elle par la loi mathématique de l'attraction newtonienne qui régit leurs mouvements de révolution en considérant toute leur masse comme réunie en leur centre ; de même les satellites ont conservé avec leur planète des relations bien autrement intimes.

La nébuleuse solaire agit d'une façon continue sur chacune des molécules constituant la planète pour la déplacer par rapport à l'ensemble; par suite de cette action, elle change d'une façon continue la forme extérieure de celle-ci (et sans doute aussi sa constitution intérieure), déplace d'une façon continue le plan de son équateur de façon que si, leur distance n'étant pas trop grande, son action est assez intense, elle le ramène en arrière jusque vers une inclinaison voisine de 0°. De là, le partage des planètes en deux groupes : l'un, qui comprend les plus rapprochées du Soleil, les plus récentes, à rotation axiale directe; l'autre, qui comprend les plus éloignées, les plus anciennes, à rotation axiale rétrograde.

Les satellites, qui paraissent s'être en général formés à l'époque tardive où cette action de la nébuleuse solaire avait accompli la plus grande partie de son effet, ont pris pour leur mouvement de révolution le même sens que celui de la rotation de la planète à l'époque de leur formation. Mais en outre ils ont, par une action du même genre sur la déformation planétaire, contribué à accentuer ce groupement. Tous ceux provenant du premier groupe de planètes, c'est la presque totalité et ce sont les plus actifs, qui se sont formés alors que l'inclinaison du plan de l'équateur planétaire était déjà inférieure à 90° ont contribué, et contribuent encore, à diminuer cette inclinaison et à amener ce plan vers celui de l'équateur solaire.

Ceux des planètes éloignées, dont l'action solaire n'avait pu attirer

l'équateur au delà de 90°, ont au contraire agi, et agissent encore, pour augmenter cette inclinaison et la faire revenir à sa valeur primitive de 180°.

Ainsi s'explique la diversité actuelle des inclinaisons des équateurs planétaires et des plans des orbites.

Quoiqu'elles suivent toutes le même mode de formation, les planètes n'ont pas pris naissance dans les mêmes conditions : les plus éloignées, s'étant formées les premières, proviennent d'anneaux volumineux, mais à faible densité ; elles doivent donc être plus grosses et moins denses que les plus récentes dues à des anneaux de moindre volume, mais de densité plus grande. C'est ainsi que s'est formé un second groupement : celui des planètes à fort volume, faible densité, à satellites nombreux, et celui des planètes petites, denses et presque dépourvues de compagnons.

Après le grand effort qui a donné naissance à Jupiter, géant du système planétaire, et la condensation qui l'a suivi, la nébuleuse solaire a été pendant quelque temps incapable de détacher assez de matière pour produire un nouvel anneau ; les particules qu'elle a laissées échapper, dispersées dans un espace considérable, n'ont pu se réunir en une seule masse, elles sont restées indépendantes les unes des autres et constituent l'essaim des astéroïdes.

La densité des portions superficielles de la nébuleuse solaire est alors devenue beaucoup plus grande ; les anneaux qu'elle peut détacher sont moins volumineux et donnent naissance à des planètes denses, petites et dans lesquelles le pouvoir producteur de satellites a considérablement diminué et bientôt deviendra nul.

Mars a deux satellites minuscules, dont les dimensions ne surpassent pas celles des astéroïdes de 13e grandeur, soit le cinquantième de celles de la Lune ; de plus, le plus intérieur d'entre eux circule autour de la planète dans des conditions tout à fait exceptionnelles et dont nous cherchons encore l'explication.

La Terre n'a qu'un compagnon, assez gros d'ailleurs, mais qu'on ne peut facilement assimiler aux satellites des grosses planètes ; ce corps s'étant formé à l'intérieur de la nébuleuse terrestre, y ayant vécu longtemps et s'en étant séparé suivant un mode tout particulier [1].

---

[1] *Voir* à ce sujet le remarquable Ouvrage *La Terre et la Lune*, par M. P. Puiseux.

Pour les planètes Vénus et Mercure, sœurs cadettes de la Terre, tout pouvoir de production de satellites, à moins qu'ils ne soient encore plus petits que ceux de Mars, a disparu.

Ceci n'est qu'un exposé rapide ; on en a, à dessein, écarté certains détails encore inexpliqués, comme l'accroissement progressif du volume des planètes jusqu'à Jupiter, l'énormité relative des dimensions de cette planète dans le système planétaire et de Titan dans celui de Saturne. Néanmoins, tel qu'il est, il nous paraît jeter sur la formation de cette portion du monde solaire une assez vive clarté.

La base essentielle de la conception géniale de Laplace en forme encore le plus sûr fondement ; le système solaire tout entier provient d'une matière unique, encore inconnue, qui, s'agglomérant en particules diverses dans des conditions variées d'énergie, a produit ces différents éléments que nous trouvons dans les planètes, ainsi que dans le Soleil actuel.

A peu près à la même époque que Laplace, un autre astronome, non moins célèbre, W. Herschel, arrivait par une autre voie à la même conclusion, non seulement pour le système solaire, mais pour l'univers tout entier.

Dans ces dernières années, on a reconnu que ces éléments, considérés jusque-là comme formant des individualités distinctes et immuables, pouvaient se transmuer les uns dans les autres de façon à reproduire progressivement le plus léger d'entre eux, parcourant alors en sens inverse le cycle de transformations qui leur avait donné naissance : nul doute que, dans l'avenir, on arrivera à retrouver par des procédés analogues le substratum inconnu dont ils dérivent tous.

Ainsi se vérifient les belles conceptions de Laplace et de W. Herschel : c'est à ces deux hommes que nous devons le meilleur de nos connaissances sur la formation de notre monde et de ceux qui l'entourent; aussi n'est-ce qu'œuvre de justice d'associer ici leurs noms dans un même sentiment de reconnaissante admiration.

FIN.

TABLE DES MATIÈRES.

Pages.

PRÉFACE V

INTRODUCTION.

DONNÉES GÉNÉRALES SUR LE SYSTÈME PLANÉTAIRE.

Lois de Képler. Excentricités. Plan commun à toutes ces orbites. Sens commun de ces mouvements 1
Distances. Loi de Bode-Titius 3
Dimensions. Masses. Densités 4
Partage des planètes en deux groupes 6
Rotations 7
Résumé 8

PREMIÈRE PARTIE.

CHAPITRE I.

MERCURE ET VÉNUS.

I. — *Différence entre ces planètes.*

Variations de leurs éclats. Albedos 9

II. — *Atmosphère de Vénus.*

Allongement des cornes du croissant. Schrœter, Mædler et Neison 11
Vénus à sa conjonction inférieure. Derham, Zenger, Perrotin 12
Aspect de Vénus lors de ses passages sur le Soleil. Mouchez, Vessey 15
Passage de Mercure sur le Soleil. Expérience faite à l'Observatoire de Greenwich 17

III. — *Rotation de Vénus et de Mercure.*

Pages.
Exposé de la question 18
Difficultés du problème 19
J.-D. Cassini, Bianchini 20
W. Herschel, Schrœter 21
De Vico. Durée de rotation. Position de l'axe 23
Vogel 24
Objections 25
Kirkwood. Marées internes 25
Schiaparelli 26
Holden 27
Étude de Schiaparelli sur Mercure 27
Discussion 28
Trouvelot, Niesten, Stuyvaert, Perrotin, Antoniadi, Flammarion 29
Nouvelles recherches. Schiaparelli, Brenner, Villiger, Barnard 31
Trouvelot. Taches polaires. Bouquet de la Grye. Aplatissement 31
G.-H. Darwin 34
Méthode spectroscopique. Belopolsky. Lowell et Slipher 34
Conclusion 35
Température de Vénus et de Mercure 35

CHAPITRE II.

MARS.

I. — *Données générales sur cette planète.*

Son éclat. Ses phases 37
Taches sombres; Fontana. Rotation, aplatissement; J.-D. Cassini, W. Herschel. 38
Beer et Mædler, Schmidt 38
Axe de rotation; Oudemans 39

II. — *Climatologie de Mars.*

Comparaison de son régime climatérique à celui de la Terre 39
Calottes polaires. Huygens, Maraldi 40
Beer et Mædler 40
Barnard, Lowell 41
Ces calottes indiquent les neiges polaires de Mars 43
Atmosphère de Mars. Analogies avec la Terre 44

III. — *Géographie de Mars.*

Aréographie 44
Cartes de Mars. W. Herschel, Beer et Mædler 45
Kaiser, Dawes, Flammarion 45
Mers et continents de Mars 46
Aspect d'ensemble de Mars 47

Pages.
Montagnes polaires de Mars 49
Nuages de Mars 50
Canaux de Mars. Schiaparelli 51
Dédoublement des canaux 54
Christie, Perrotin, Proctor 55
Lowell, Douglas, W.-H. Pickering. Les mers de Mars sont des plaines cultivées 56
Les canaux de Schiaparelli sont des vallées cultivées 56
Oasis 57
Activité des habitants de Mars 57
Objections 58
Expériences de Maunder 59
Observations de M. Millochau 64
Photographies de Lampland 68
Expédition de Todd 69
Objections. Nature de l'image photographique. MM. André et Angot 70
Expériences de M. A. Lumière 71
Expériences de M. S. Newcomb 72
La canalisation de Schiaparelli et Lowell n'existe pas 73
Température à la surface de Mars 74

CHAPITRE III.

PETITES PLANÈTES.

I. — *Historique. Notions générales.*

Hypothèse de Képler. Propositions du baron de Zach et de Lalande 75
Cérès. Piazzi, Gauss 75
Pallas. Olbers 76
Astéroïdes. W. Herschel 76
Junon, Vesta. Théorie d'Olbers 77
Cartes de l'Académie de Berlin. Bessel 78
Astrée, Encke 78
Cartes écliptiques de Chacornac. Cartes photographiques de MM. Henry 79
Recherches photographiques directes. Max Wolf 79
Emploi du stéréocomparateur 81
Berliner Astronomisches Jahrbuch 82
Conclusion 83

II. — *Dimensions des astéroïdes.*

Diamètres angulaires et réels des astéroïdes; leurs albedos 83

III. — *Variations d'eclat des astéroïdes.*

Premières indications 86
Cause de ces variations; appel d'Argelander 87

Pages.
Frigga, sa disparition. C.-H.-F. Peters 87
Variations lentes. Influence de la phase. G. Müller 88
Variations rapides. Éros, Egon von Oppolzer 89

III *bis*. — *Nombre et masse totale des astéroïdes.*

Statistique par ordre de découverte et de grandeur stellaire 92
Masse totale des astéroïdes. Le Verrier 93

IV. — *Constitution de l'anneau des astéroïdes.*

Dimensions de l'anneau des astéroïdes 94
Distribution des astéroïdes : *a*. Distribution d'ensemble, Stroobant, J. Mascart. *b*. Distribution de détail, Bauschinger. Représentation géométrique 95

V. — *Mode de formation de cet anneau.*

Distribution singulière des lacunes. Loi de Kirkwood 101
Les lacunes préexistent à l'action de Jupiter 102
Origine des fortes inclinaisons et des fortes excentricités 103
Fortes inclinaisons. Le Verrier 103
Fortes excentricités. Tisserand 104
Le mode de formation des astéroïdes se rattache au mode général de formation du système solaire : Laplace 104
De Freycinet 104
Relations entre les orbites des astéroïdes et Jupiter. S. Newcomb, Callandreau. 107
Résumé 109

VI. — *Parenté des astéroïdes.*

Analogie des éléments : J. Mascart 109

VII. — *Éros et* 1906 *T. G.*

Éros, Berberich 110
1906 T. G., Kopff, Lagrange, Charlier 112
Conclusion 114

VIII. — *Utilité astronomique des astéroïdes.*

Considérations générales 115
Parallaxe du Soleil. Éros 115
Masse de Jupiter. Thulé 115
Étude physique 116

CHAPITRE IV.

JUPITER.

I. — *Bandes équatoriales.*

Pages.
Caractères principaux 117

II. — *Grande tache rouge.*

J.-D. Cassini, Maraldi 119
Niesten, Lohse, Hough, Denning 120
Ses mouvements en latitude et longitude. Variabilité de la durée apparente de rotation 121
Son invariabilité de forme et de position relative. Son état 121
Autres objets remarquables sur le disque de Jupiter 122
Explication de ces apparences 124
Observations de Beer et Mædler 124
Vents alizés. Fontenelle, W. Herschel 124
Courants joviens. Belopolsky, Stanley Williams 125
Courant temporaire 126
Discussion de ces hypothèses 127
Taches diverses. Explication de Hough 127
Conclusion 127

CHAPITRE V.

SATURNE.

I. — *Huygens.*

Huygens. Son instrument, découverte de l'anneau 126

II. — *Étude physique de Saturne.*

Globe. J.-D. Cassini 130
Rotation. W. Herschel, Asaph Hall, Barnard 132

III. — *Anneaux de Saturne.*

Division de Cassini 133
Anneau de Bond 134
Observation de Barnard. Cet anneau est transparent 135
Forme irrégulière de l'ombre des anneaux 136
Constitution des anneaux de Saturne 137
Preuve spectroscopique. Keeler, Deslandres, Belopolsky 138
Non-coïncidence des centres des anneaux et de la planète 139
Saturne sans anneaux 140
Anomalie dans la rotation des anneaux de Saturne. W. Herschel, Deslandres... 141

CHAPITRE VI.

URANUS.

Pages.
Astre nouveau dans les Gémeaux 143
Nature de cet astre. Herschel le prend pour une comète 143
Invraisemblance de cette assertion. De Saron 144
C'est une planète nouvelle. Laplace 144
Observations d'Uranus antérieures à sa découverte 145
Figure de la planète; sa rotation. Herschel, Brenner 146

CHAPITRE VII.

NEPTUNE.

I. — *Irrégularités du mouvement d'Uranus.*

Tables de Bouvard. Irrégularités du mouvement d'Uranus 147
Ces irrégularités pourraient servir au calcul de l'orbite d'une planète inconnue. 148
Arago et Le Verrier 148
Énoncé du problème par Le Verrier 149

II. — *Considérations générales sur les perturbations astronomiques.*

Mouvement elliptique 150
Mouvement troublé. Variations séculaires 150
Application de ces principes à Uranus 151
Introduction de la planète inconnue 151

III. — *Calcul des éléments de la planète inconnue. Solution de Le Verrier.*

Calculs préparatoires. Examen des hypothèses possibles 152
Ces irrégularités ne peuvent s'expliquer que par l'action d'une planète inconnue. 154
Énoncé plus précis du problème 154
Route à suivre pour sa solution 155
Première approximation 156
Seconde approximation 156
Comparaison avec l'observation 157
Conditions de recherche. Aspect physique de l'astre inconnu 158
Étendue de la zone à explorer 159
Confirmation expérimentale 159
Découverte de la planète. Galle 160
Conclusion 161

IV. — *Travaux de John Couch Adams.*

Origine de ces travaux 161
Première approximation. Orbite circulaire 162

Pages.
Deuxième approximation. Orbite elliptique 163
Communication de la solution à Airy. Ses objections 163
Regrets d'Airy. Retards apportés à la recherche directe 164
Réponse d'Adams à Airy. Éléments définitifs 165
Comparaison des éléments théoriques aux éléments actuels. Conclusions 165

CHAPITRE VIII.

PLANÈTES INTRAMERCURIELLES ET EXTRANEPTUNIENNES.

Planètes intramercurielles 168
Planètes extraneptuniennes 169
Conclusions 170

CHAPITRE IX.

DISTANCE DES PLANÈTES AU SOLEIL.

Définition de la parallaxe 171
Mesure de la parallaxe. Déclinaisons 172
Ascensions droites 172
Résultats 173

DEUXIÈME PARTIE.

SATELLITES.

CHAPITRE I.

SATELLITES DE VÉNUS.

Opinions des anciens astronomes. Recherches de Stroobant 176

CHAPITRE II.

SATELLITES DE MARS.

Croyance ancienne. Essais de W. Herschel 178
D'Arrest 178
Asaph Hall. Phobos et Deïmos 178

CHAPITRE III.

SATELLITES DE JUPITER.

I. — *Historique.*

Pages.
Galilée 181
J.-D. Cassini, Rœmer, Delambre 182

II. — *Phénomènes des satellites.*

Éclipses 182
Application à la détermination des longitudes 183
Galilée. Renieri. Tables de J.-D. Cassini 183
Passage de l'ombre sur le disque. Fontana 183
Passages des satellites sur le disque et leurs occultations. J.-D. Cassini 184
Relations entre les passages des satellites et ceux de leurs ombres 185
Combinaison de ces phénomènes 185
Mêmes phénomènes en dehors du disque de la planète 186
Jupiter sans satellites 186
Relation entre les trois premiers satellites 187

III. — *Étude détaillée des satellites.*

Diamètres et densités. J.-D. Cassini, Schrœter, Barnard 188
Aspect physique des satellites 190
Satellite I. Io 191
Satellite II. Europe 191
Satellite III. Ganymède 191
Satellite IV. Callisto 193
Rotation des satellites, leurs durées. W. Herschel, Schrœter 193
Engelmann, Ed. Pickering 194
Éclats relatifs; albedos. Pickering, Spitta 194

IV. — *Nouveaux satellites.*

Satellite V. Barnard 196
Satellites VI et VII 197
Satellite VIII 199

CHAPITRE IV.

SATELLITES DE SATURNE.

Conditions de leur découverte. Huygens, J.-D. Cassini, W. Herschel, C.-P. Bond. 201
Relation entre les durées de révolution des quatre premiers satellites 203
Rétrogradation des nœuds de Titan. Bessel 203
Diamètre de Titan. Barnard 204
Éclats des satellites. Leurs variations. W. Herschel, Schrœter, E. Pickering 204

Phénomènes des satellites de Saturne.

Pages.
Périodes de durée de ces phénomènes 206
Observations correspondantes 207

Nouveaux satellites.

Phœbé, W.-H. Pickering et Frost 209
Thémis, W.-H. Pickering 210
Comparaison des anomalies des systèmes de Jupiter et de Saturne 210

CHAPITRE V.

SATELLITES D'URANUS.

Premières découvertes de W. Herschel, six satellites 212
John Herschel 212
Lamont 213
Composition réelle du monde d'Uranus. Lassell 213
Éclats de ces satellites. Mouvement rétrograde des satellites d'Uranus 215

CHAPITRE VI.

SATELLITE DE NEPTUNE.

Lassell. Le mouvement de ce satellite est rétrograde 217
Dimensions 217
Anomalie de son éclat 218

CHAPITRE VII.

RÉSUMÉ.

Tableau récapitulatif des éléments des satellites 219
Remarques relatives à ce Tableau 221

CHAPITRE VIII.

MASSES DES PLANÈTES ET DE LEURS SATELLITES.

I. — *Masses des planètes.*

Planètes ayant un satellite 223
Planètes n'ayant pas de satellites. Vénus et Mercure 225
Jupiter. Captation des comètes. Énoncé général 226
Comète de Lexell 226
Comète de Winnecke 227

Pages.
Emploi des astéroïdes. Remarque 227
Masse de la Terre en kilogrammes 228

II. — *Masses des satellites.*

Jupiter. Travaux de Laplace 228
Saturne. Anneaux de Saturne 229
Mars, Uranus et Neptune 229

III. — *Masse de la Lune.*

Par le mouvement de nutation de l'axe de la Terre 230
Par l'inégalité lunaire de la Terre 231
Par le phénomène des marées 232
Nombre conclu 233

TROISIÈME PARTIE.

FORMATION DU SYSTÈME PLANÉTAIRE.

CHAPITRE I.

LAPLACE ET SES SUCCESSEURS.

I. — *Laplace.*

Hypothèse de Laplace 235

II. — *Travaux de E. Roche.*

Atmosphère. Surfaces de niveau. Surface limite. Surface libre 239
Anneaux de Laplace 242
Formation des planètes 243
Formation des satellites 245
La région des astéroïdes 246
Anneaux intérieurs 247
Anneaux de Saturne 249
Satellites de Mars 250
Formation de la Lune 251
Résumé 252

III. — *Travaux de Darwin.*

Notions sur les marées 253
Évaluation des énergies 255

Pages.
Marée solaire. Mercure, Vénus..... 257
Influence de la masse. Mars, Phobos..... 257
Inclinaison de l'équateur de Mars..... 258
Jupiter..... 259
Saturne, Uranus, Neptune..... 259
Résumé..... 259

IV. — *Hypothèse de Faye.*

Constitution de la nébuleuse..... 260
Planètes à rotation directe..... 261
Planètes à rotation rétrograde..... 261
Satellites..... 262
Discussion..... 262

V. — *Travaux de Stratton. Inversion planétaire.*

Suggestion de W.-H. Pickering..... 263
A l'origine toutes les planètes tournaient dans le sens rétrograde..... 264
Inversion planétaire..... 264
Résultats de M. Stratton..... 265
Marées solaires. Planètes sans satellites..... 266
Mercure et Vénus..... 266
Mars..... 266
Marées satellitaires. Planètes avec satellites..... 266
Jupiter, Satellite VIII. Saturne, Phœbé..... 267
Comparaison des marées solaires sur les différentes planètes..... 268
Uranus, Neptune..... 268
Résumé..... 269

VI. — *Conclusion.*

Conclusion..... 270

PLANCHES.

Planche I. — Modèle de Newcomb..... 74
Planche II. — Dessins à 30^m de distance de S.-I. Bailey et de W.-H. Pickering. 74
Planche III. — Dessins à 30^m de distance et à l'œil nu de E. Bernard et Ph. Fox..... 74

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

PARIS. — IMPRIMERIE GAUTHIER-VILLARS,
40049 Quai des Grands-Augustins, 55.

LIBRAIRIE GAUTHIER-VILLARS,
QUAI DES GRANDS-AUGUSTINS, 55, A PARIS (6e).

Envoi franco dans toute l'Union postale contre mandat-poste ou valeur sur Paris.

LA TERRE ET LA LUNE

FORME EXTÉRIEURE ET STRUCTURE INTERNE

Par P. PUISEUX,
Astronome à l'Observatoire de Paris.

IN-8 (25-16) DE IV-176 PAGES AVEC 28 FIG. ET 26 PLANCHES; 1908. 9 FR.

La riche collection de documents photographiques dont la Lune a fourni les éléments dans ces dernières années a rendu possible et opportune l'étude comparée de notre planète et de son satellite.

M. Puiseux, que sa collaboration au grand *Atlas photographique* de l'Observatoire de Paris désignait pour entreprendre ce travail, a d'abord résumé en sept Chapitres d'une lecture attachante les résultats généraux obtenus sur le relief et la constitution interne du globe terrestre.

Ces études trouvent dans l'interprétation des photographies lunaires leur application la plus directe et la plus sûre, en même temps qu'un contrôle précieux. Les modifications constatées par les astronomes sont si rares et si lentes qu''il est prématuré de vouloir en définir la marche. Mais les traits actuels du relief lunaire, convenablement interrogés, racontent eux-mêmes leur histoire. C'est ainsi que l'architecte, mis en présence d'un édifice écroulé, n'a pas besoin d'avoir assisté à la construction pour rétablir le plan primitif et pour déterminer les causes de ruine.

M. Puiseux s'est attaché au problème passionnant de cette reconstitution historique avec une sagacité qui lui a valu le suffrage d'astronomes et de naturalistes éminents, et que de plus nombreux lecteurs seront maintenant à même d'apprécier.

Table des Matières.

Ire Partie. *La Terre.* — CHAP. I. La notion de la figure de la Terre, de Thalès à Newton. — CHAP. II. L'aplatissement du globe. Essais de théorie mathématique de la figure de la Terre. — CHAP. III. Résultats généraux des mesures géodésiques. Variations observées de la pesanteur à la surface. — CHAP. IV. Les grands traits du relief terrestre et du dessin géographique. — CHAP. V. L'histoire du relief terrestre: les principales théories orogéniques. — CHAP. VI. La structure interne d'après les données de la Mécanique céleste et de la Physique. — CHAP. VII. La structure interne d'après les données de l'Astronomie et de la Géologie. — **IIe Partie.** *La Lune.* — CHAP. VIII. La confi-

guration de la Lune étudiée par les méthodes graphiques et micrométriques. Les cartes lunaires. — CHAP. IX. La genèse du globe lunaire et les conditions physiques à sa surface. — CHAP. X. La figure de la Lune étudiée sur les documents photographiques. Les traits généraux du relief. — CHAP. XI. Les cirques lunaires et les principales théories sélénologiques. — CHAP. XII. L'intervention du volcanisme dans la formation de l'écorce lunaire. — CHAP. XIII. Les formes polygonales sur la Lune. — CHAP. XIV. Témoignage apporté par la Lune dans le problème de l'évolution des planètes. — PLANCHES.

A LA MÊME LIBRAIRIE.

ANDRÉ (Ch.), Directeur de l'Observatoire de Lyon, Professeur d'Astronomie à l'Université de Lyon. — **Traité d'Astronomie stellaire.** 2 volumes in-8 (25-16), se vendant séparément :

Ire PARTIE : *Étoiles simples.* Avec 29 fig. et 2 planches; 1899. 9 fr.

IIe PARTIE : *Étoiles doubles et multiples. Amas stellaires.* Avec 74 fig. et 3 planches; 1900 ..... 14 fr.

ANDRÉ et RAYET, Astronomes adjoints de l'Observatoire de Paris, et **ANGOT**, Professeur de Physique au Lycée de Versailles. — **L'Astronomie pratique et les Observatoires en Europe et en Amérique**, depuis le milieu du XVIIe siècle jusqu'à nos jours. In-16 (19-12), avec belles figures et planches en couleur.

Ire PARTIE : *Angleterre;* 1874 ..... 4 fr. 50 c.

IIe PARTIE : *Écosse, Irlande et Colonies anglaises;* 1874. 4 fr. 50 c.

IIIe PARTIE : *Amérique du Nord;* 1877 ..... 4 fr. 50 c.

IVe PARTIE : *Amérique du Sud,* et Météorologie américaine; 1881 ..... 3 fr.

Ve PARTIE : *Italie;* 1878 ..... 4 fr. 50 c.

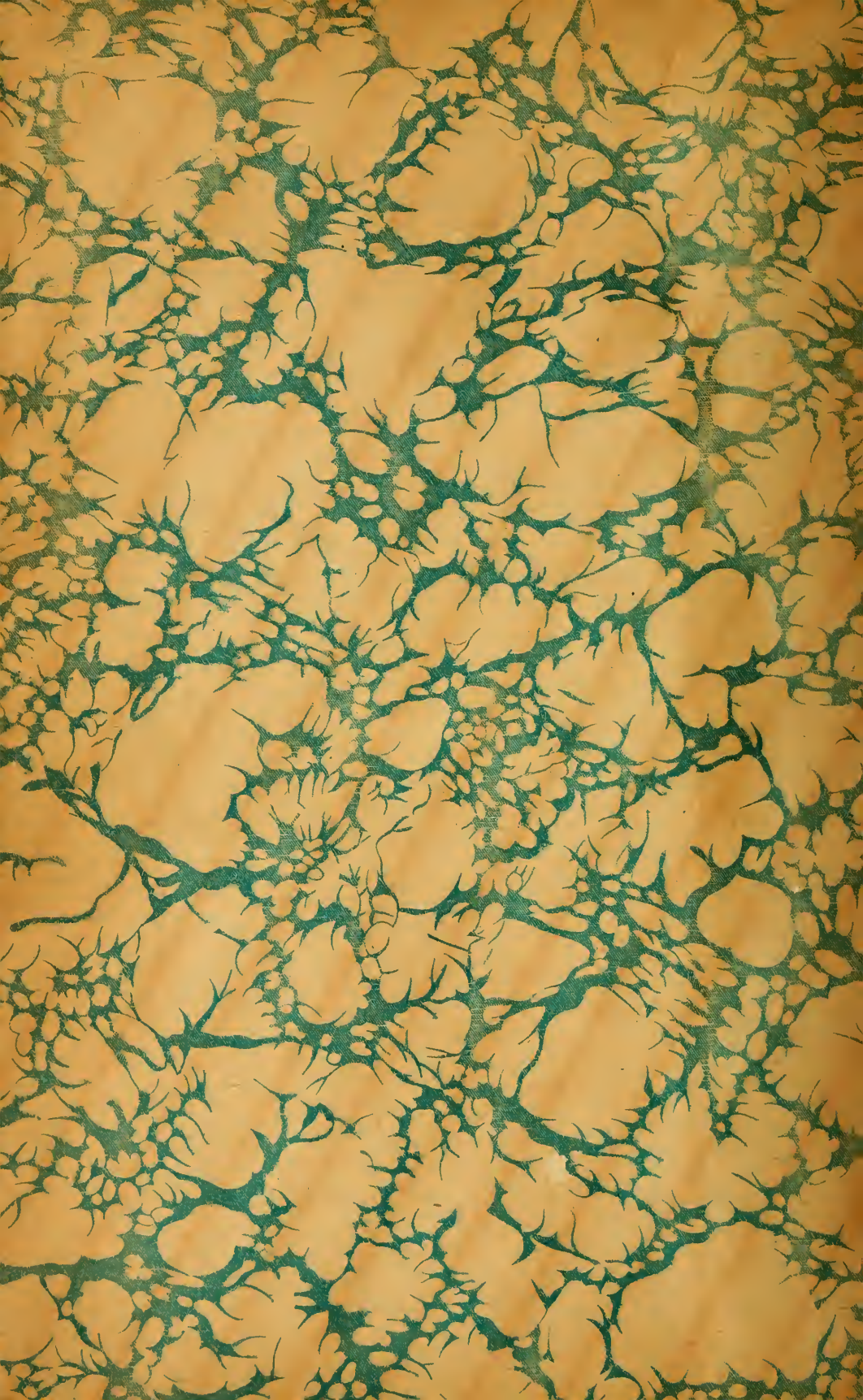
Chaque Partie se vend séparément.

PUISEUX (Pierre), Docteur ès sciences, Astronome adjoint à l'Observatoire de Paris. — **Sur quelques Progrès récents accomplis avec l'aide de la Photographie dans l'étude du Ciel.** (Enseignement supérieur de la Photographie. Conférence de la Société française de Photographie.) In-8, avec 2 planches; 1899 ..... 2 fr. 25 c.

RADAU (R.). — **Constitution intérieure de la Terre.** In-18 jésus; 1880 ..... 1 fr. 50 c.

D'AVOUT (le baron), Capitaine d'État-Major. — **Mémoire sur la figure de la Terre.** In-8 avec planches; 1852 ..... 2 fr. 50 c.

3



QB601.A5 ASTRO
3 5002 00014 7848
Andre, Charles Louis Francois
Les planetes et leur origine.

QB
601
A5 00014 7848

AUTHOR
André 101951

TITLE
Les Planètes st leur Origine

DATE DUE | BORROWER'S NAME

Astron

QB
601
A5 101951

G. E. Stechert & Co.
Alfred Hafner
New York